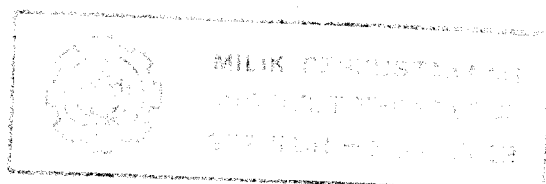


3100098010235



Andasi 2352

# STUDI PENALAAAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MENGUNAKAN TEKNIK RESPON FREKUENSI

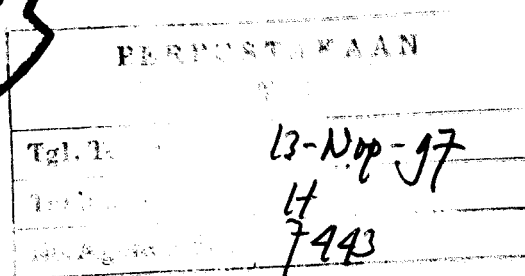
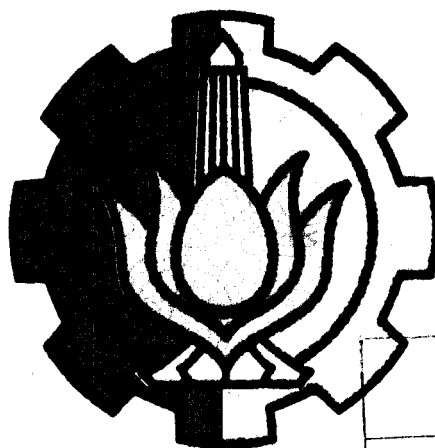
## TUGAS AKHIR

Disusun oleh :

I NYOMAN WISNAWA

NRP. 2292.100.099

RSE  
621.31  
Wes  
S-1  
1997



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
1997

# STUDI PENALAAAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MENGUNAKAN TEKNIK RESPON FREKUENSI

## TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro  
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I



(Ir. SIDARJANTO)

Dosen Pembimbing II



(Ir. IMAM ROBANDI, M.T.)

SURABAYA

September, 1997

## **ABSTRAK**

Ukuran dan perincian dari simulasi sistem tenaga modern membutuhkan keluaran energi dan waktu yang besar dalam pengecekan dan pengujian data untuk menala suatu sistem yang mengalami gangguan, sehingga diperoleh sistem yang stabil kembali. Untuk itu maka dicari suatu metode dalam pengecekan data sehingga waktu dan energi yang dibutuhkan menjadi lebih cepat.

Salah satu metode yang digunakan adalah metode respon frekuensi dengan menggunakan Bode diagram atau diagram logaritmik. Kelebihan utama penggunaan diagram Bode adalah bahwa perkalian dapat diubah menjadi penjumlahan serta penyajian logaritmik berguna dalam menunjukkan karakteristik fungsi alih, baik pada frekuensi rendah maupun pada frekuensi tinggi dalam satu diagram.

Dari tipe-tipe sistem eksitasi, penalaan akan dilakukan dengan menggunakan tipe filter lag-lead dan tipe umpan balik kecepatan (rate feedback). Perhitungan yang diperoleh dari penggambaran diagram Bode ke dua tipe tersebut, akan digunakan untuk menala parameter-parameter pada sistem eksitasi, sehingga diperoleh kinerja sistem yang lebih baik.

## **ABSTRACT**

Size and detail of modern power system simulations, demand large expenditures of time and energy for data checking and verification for tuning system to experience of disturbance, in order to fullfil the stability of system. Therefore, to search one method for data checking so that time and energy needed became faster.

One of the used method is frequency response method with Bode diagram or logarithmic diagram. It gives some advantages such as that multiple can be change became addition and the illustration of logarithmic is important to indicate transfer function characteristic at low frequency or high frequency in one diagram.

From types of excitation system, for tuning will be done with use lag-lead filter type and rate feedback type. The calculation from Bode diagram, in order to get the performance system expectation (stability) both of those types will be used for tuning of parameters excitation system.

## KATA PENGANTAR

---

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Ida Sang Hyang Widhi Wasa, Tuhan yang Maha Pengasih dan Penyayang atas segala rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

### STUDI PENALAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MENGUNAKAN TEKNIK RESPON FREKUENSI

Tugas akhir ini dibuat dengan maksud untuk memenuhi sebagian persyaratan mendapat gelar sarjana Teknik Elektro, dalam bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, dengan beban studi 6 SKS.

Penulis berharap agar tulisan ini bermanfaat dan bisa memberi sumbangan pemikiran, dalam kaitannya ikut berpartisipasi mensukseskan pembangunan bangsa dan negara.

Surabaya, September 1997

Penulis

## DAFTAR ISI

---

JUDUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
UCAPAN TERIMA KASIH .....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN .....	xv
BAB I    PENDAHULUAN .....	1
1.1   LATAR BELAKANG .....	1
1.2   TINJAUAN PUSTAKA .....	3
1.3   PEMBAHASAN DAN BATASAN MASALAH .....	4
1.4   METODOLOGI .....	4
1.5   SISTEMATIKA PEMBAHASAN.....	5
1.6   TUJUAN DAN RELEVANSI .....	6
BAB II    TEKNIK   RESPON   FREKUENSI   DAN   KONTROL SISTEM EKSITASI UNTUK KESTABILAN SISTEM .....	7
2.1   TEKNIK RESPON FREKUENSI .....	7
2.1.1   Diagram Logaritmik .....	8
2.1.1.1   Diagram Bode .....	9
2.1.1.2   Diagram Polar .....	12

2.1.1.3	Diagram Log Besar Terhadap Sudut Phasa .....	12
2.1.2	Pendekatan Respon Frekuensi Pada Desain Sistem Kontrol .....	13
2.1.3	Teknik Respon Frekuensi Sebagai Kontrol Penalaan Sistem .....	15
2.2	KONTROL SISTEM EKSITASI UNTUK KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK.....	18
2.2.1	Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	19
2.2.2	Diagram Blok Mesin Sinkron Tunggal .....	22
2.2.3	Kriteria Kinerja Sinyal Kecil.....	26
2.2.4	Penalaan Sistem Eksitasi.....	28
 BAB III	 PEMODELAN DAN PENALAN PARAMETER SISTEM EKSITASI .....	 29
3.1	PENDAHULUAN .....	29
3.2	PARAMETER - PARAMETER SISTEM EKSITASI...	30
3.2.1	Parameter Regulator dan Amplifier .....	30
3.2.2	Parameter Eksiter .....	31
3.2.3	Parameter Stabilisasi .....	32
3.3	PERKEMBANGAN SISTEM EKSITASI .....	32
3.4	TIPE SISTEM EKSITASI DAN PEMODELANNYA..	35
3.4.1	Sistem Eksitasi Tipe DC-Sistem dengan Eksiter Komutator DC Rotasi .....	35
3.4.1.1	Model Sistem Eksitasi Tipe DC 1 .....	36
3.4.1.2	Model Sistem Eksitasi Tipe DC 2 .....	38
3.4.1.3	Model Sistem Eksitasi Tipe DC 3 .....	38
3.4.2	Sistem Eksitasi Tipe AC-Rectifier Sistem Eksitasi Yang Disuplai Oleh Alternator .....	40
3.4.2.1	Model Sistem Eksitasi Tipe AC 1 .....	40

3.4.2.2	Model Sistem Eksitasi Tipe AC 2 .....	42
3.4.2.3	Model Sistem Eksitasi Tipe AC 3 .....	43
3.4.2.4	Model Sistem Eksitasi Tipe AC 4 .....	45
3.4.3	Sistem Eksitasi Tipe Statis .....	47
3.4.3.1	Model Sistem Eksitasi Tipe ST 1 .....	47
3.4.3.2	Model Sistem Eksitasi Tipe ST 2 .....	50
3.4.3.3	Model Sistem Eksitasi Tipe ST 3 .....	51
3.5	PENALAAAN TERHADAP PARAMETER SISTEM EKSITASI UNTUK MEMBERIKAN KINERJA SISTEM YANG LEBIH BAIK .....	52
3.5.1	Filter Lag-Lead Pada sistem Eksitasi .....	52
3.5.2	Umpan Balik Kecepatan (Rate Feedback) Pada Sistem Eksitasi .....	56
3.6	REDUKSI MODEL SISTEM EKSITASI MENJADI TIPE LAG-LEAD ATAU RATE FEEDBACK .....	61
BAB IV	ALGORITMA PERHITUNGAN .....	64
4.1	ALGORITMA .....	64
4.2	DATA .....	66
4.3	HASIL SIMULASI DAN PERHITUNGAN .....	67
4.3.1	Pemilihan Model Sistem Eksitasi .....	68
4.3.2	Simulasi Dan Penalaan Parameter Sistem Eksitasi Tipe DC 1 Dengan Filter Lag-Lead .....	68
4.3.3	Simulasi Dan Penalaan Parameter Sistem Eksitasi Tipe AC 1 Dengan Tipe Umpan Balik Kecepatan .....	71
4.4	ANALISIS .....	72
BAB V	PENUTUP .....	77
5.1	KESIMPULAN .....	77



5.2 SARAN - SARAN.....	78
DAFTAR PUSTAKA .....	79
LAMPIRAN A : PROGRAM SIMULASI PENALAAAN NILAI K UNTUK MEMBERIKAN KINERJA SISTEM YANG LEBIH BAIK .....	81
LAMPIRAN B : STABILISASI SISTEM KONTROL EKSITASI DAN REDUKSI GAIN TRANSIENT (TRANSIENT GAIN REDUCTION) .....	83
LAMPIRAN C : PENGERTIAN DARI LIMIT (BATAS) .....	85
LAMPIRAN D : LISTING PROGRAM SIMULINK .....	87

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bode plot $[G]$ pada fungsi alih persamaan (2.2) .....	11
Gambar 2.2	(a) Contoh-contoh kurva respon frekuensi loop terbuka yang diinginkan dan tak diinginkan (b) Contoh-contoh kurva respon frekuensi loop tertutup yang diinginkan dan tak diinginkan .....	15
Gambar 2.3	Sistem umpan balik orde ke dua .....	16
Gambar 2.4	Step respon sebagai fungsi phasa margin (dengan input 5 %) .....	17
Gambar 2.5	Step respon dari sistem pada gambar 2.3 jika $K = 12,5$ (dengan input 5 %) .....	18
Gambar 2.6	Diagram sistem pembangkitan tenaga listrik .....	21
Gambar 2.7	Diagram blok generator sinkron dan sistem eksitasi .....	24
Gambar 2.8	Model sistem eksitasi pada mesin tunggal .....	25
Gambar 2.9	Respon frekuensi loop terbuka dari sistem kontrol eksitasi dengan mesin sinkron rangkaian terbuka .....	26
Gambar 2.10	Respon frekuensi loop tertutup dari sistem kontrol eksitasi dengan mesin sinkron rangkaian terbuka .....	27
Gambar 3.1	Diagram blok rangkain eksitasi .....	30
Gambar 3.2	Blok regulator dan amplifier .....	31
Gambar 3.3	Blok eksiter .....	31
Gambar 3.4	Blok stabilisasi $V_F$ .....	32
Gambar 3.5	Tipe DC 1 - Eksiter Komutator DC .....	36
Gambar 3.6	Tipe DC 2 - Eksiter Komutator DC .....	38
Gambar 3.7	Tipe DC 3 - Tanggapan regulator tak kontinyu .....	39

Gambar 3.8	Tipe AC 1 - Sistem eksitasi Alternator-Rectifier dengan rectifier tidak dikontrol dan umpan balik dari arus medan eksitasi .....	41
Gambar 3.9	Tipe AC 2 - Respon awal yang tinggi dari Sistem Eksitasi Alternator Rectifier dengan rectifier tak terkontrol dan umpan balik arus medan eksiter .....	43
Gambar 3.10	Tipe AC 3 - Alternator dengan rectifier eksiter .....	45
Gambar 3.11	Tipe AC 4 - Alternator yang dikontrol oleh rectifier eksiter .....	46
Gambar 3.12	Tipe ST 1 - Sumber potensial yang dikontrol oleh rectifier Eksiter .....	49
Gambar 3.13	Tipe ST 2 - Rectifier Eksiter sebagai sumber kompon .....	50
Gambar 3.14	Tipe ST 3 - Sumber kompon yang dikontrol oleh rectifier eksiter .....	51
Gambar 3.15	Filter Lag-Lead pada model tipe sistem eksitasi .....	53
Gambar 3.16	Diagram bode dari filter lag-lead model sistem eksitasi penalaan yang bagus (well-turned) .....	53
Gambar 3.17	Umpan balik kecepatan (Rate-feedback) pada model sistem eksitasi .....	56
Gambar 3.18	Bode diagram dari umpan balik kecepatan (Rate-feedback) pada model sistem eksitasi penalaan yang bagus (well-turned) .....	57
Gambar 3.19	IEEE sistem eksitasi model AC 1 ( $V_T - I_{FD}$ ) .....	62
Gambar 3.20	Reduksi pertama dari modul AC 1 menjadi tipe rate feedback ( $V_T - I_{FD}$ ) .....	63
Gambar 3.21	Reduksi kedua dari modul AC 1 menjadi tipe rate feedback ( $V_T - I_{FD}$ ) .....	63
Gambar 4.1	Flow chart.....	65
Gambar 4.2	Model DC 1 dengan filter lag-lead .....	69

Gambar 4.3	Model AC 1 setelah direduksi menjadi tipe umpan balik kecepatan .....	69
Gambar 4.4	Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe DC 1 sebelum penalaan .....	73
Gambar 4.5	Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe DC 1 setelah penalaan .....	74
Gambar 4.6	Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe AC 1 sebelum penalaan .....	75
Gambar 4.7	Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe AC 1 setelah penalaan .....	76

## DAFTAR TABEL

---

Tabel 3.1	Daya generator akan kebutuhan sumber eksitasi .....	34
Tabel 4.1	Data parameter generator .....	66
Tabel 4.2	Data parameter sistem eksitasi .....	67
Tabel 4.3	Respon waktu tegangan pada penalaan sistem eksitasi .....	72

## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

---

$E_{FD}$	:	tegangan output eksiter (tegangan medan generator)
$F_{EX}$	:	faktor pembebanan rectifier (penyearah)
$V_R$	:	output pengatur tegangan (AVR)
$V_B$	:	tegangan eksiter yang tersedia
$V_F$	:	output stabilizer sistem eksitasi
$V_E$	:	tegangan balik eksiter dari reaktansi komutasi
$V_{ERR}$	:	sinyal tegangan error
$V_S$	:	output PSS (ekivalen tegangan terminal dalam p.u)
$\overline{V}_T$	:	phasor tegangan terminal generator
$\overline{I}_T$	:	phasor arus terminal generator
$I_{FD}$	:	arus medan generator
$I_N$	:	arus beban eksiter yang dinormalkan
$K_A$	:	gain pengatur tegangan
$K_E$	:	konstanta eksiter yang berhubungan dengan medan yang dieksitasi sendiri
$K_F$	:	gain stabilizer sistem kontrol eksitasi
$K_P$	:	gain koefisien rangkaian potensial
$K_I$	:	gain koefisien rangkaian arus
$K_D$	:	faktor demagnetisasi, fungsi reaktansi eksiter alternator
$K_C$	:	faktor pembebanan rectifier (penyearah) yang berhubungan dengan reaktansi komutasi

- $T_A$  : time konstan voltage regulator
- $T_E$  : konstanta eksiter
- $T_F$  : time konstan stabilizer sistem kontrol eksitasi
- $T'_{do}$  : time konstan generator

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

---

### **1.1 LATAR BELAKANG**

Perkembangan kebutuhan akan tenaga listrik dewasa ini, sangat perlu ditunjang oleh keandalan operasi sistem tenaga listrik. Energi listrik yang tersedia dalam jumlah yang cukup dan mutu yang baik merupakan kunci keberhasilan dan perkembangan yang pesat kegiatan-kegiatan industri pada suatu negara. Hal tersebut akan memberikan kemajuan ekonomi serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat di negara tersebut.

Konversi energi mekanik menjadi energi listrik secara besar-besaran, praktis hanya dilakukan dengan generator sinkron. Oleh karena itu maka generator sinkron ini penting dan perlu dipelajari, baik mengenai penguatannya (sistem eksitasi) maupun parameter-parameter dalam generator sinkron.

Generator sinkron dapat dioperasikan sebagai sebuah mesin tunggal atau terhubung dalam suatu sistem interkoneksi . Untuk dapat beroperasi dengan baik pada kondisi interkoneksi, generator-generator tersebut harus tetap berada dalam keadaan sinkron dalam memikul beban yang memiliki karakteristik berubah-ubah, tergantung permintaan di sisi beban pada suatu sistem tenaga listrik.

Dalam studi kestabilan, untuk mengetahui apakah sistem tenaga listrik masih stabil atau tidak setelah adanya gangguan (perubahan keadaan sistem),



diamati melalui parameter-parameter keadaan sistem sebagai indikator ketidakstabilan. Perubahan ini akan menyebabkan pengendali menala kembali besaran-besaran input guna mencapai titik kesetimbangan baru. Salah satu pengendali yang berfungsi untuk mengontrol keluaran generator seperti daya, arus dan tegangan adalah melalui sistem eksitasi. Bila terjadi perubahan pada besaran-besaran tersebut, maka sistem eksitasi akan berfungsi sebagai umpan balik untuk mencapai nilai kesetimbangan baru.

Nilai parameter-parameter sistem eksitasi yang menyebabkan output yang dihasilkan menjadi tidak stabil, akan ditala dengan menggunakan pendekatan diagram Bode, baik dengan menggunakan tipe filter lag-lead maupun umpan balik kecepatan (rate feedback). Sehingga model sistem eksitasi yang digunakan, sebelumnya harus direduksi menjadi salah satu dari kedua tipe pendekatan tersebut. Nilai parameter-parameter sistem eksitasi setelah ditala tersebut, akan digunakan sebagai input yang baru sehingga sistem menjadi stabil kembali.

Sistem eksitasi yang memadai sangat diperlukan untuk menunjang stabilitas tegangan generator yang pada akhirnya dapat meningkatkan keandalan dari pusat pembangkit secara keseluruhan.

## **1.2 TINJAUAN PUSTAKA**

Dalam pengecekan dan pengujian data dari sistem yang besar diperlukan waktu dan energi yang besar. Pada tugas akhir ini akan di berikan suatu metode untuk mengertikan dan mengoreksi parameter-parameter sistem ( terutama

parameter-parameter sistem eksitasi). Metode yang digunakan adalah metode respon frekuensi dengan Bode diagram [5].

Semua model sistem eksitasi yang digambarkan pada referensi [7] (kecuali model non linear tipe DC 3) dapat direduksi menjadi salah satu dari dua tipe yang ditetapkan, yaitu sistem eksitasi tipe filter lag-lead dan tipe umpan balik kecepatan (rate feedback) [10]. Sebagai contoh dapat dilihat pada referensi [10], yaitu reduksi sistem eksitasi tipe AC 1 menjadi sistem eksitasi umpan balik kecepatan. Dari model yang diberikan, sistem eksitasi tipe AC memiliki model yang cukup rumit dibanding dengan tipe-tipe yang lain (tipe DC dan tipe Statis).

Pada masing-masing tipe sistem eksitasi tersebut (tipe filter lag-lead dan tipe umpan balik kecepatan), akan diberikan suatu rumusan untuk menala parameter-parameter yang terdapat pada sistem eksitasi [10]. Setelah dilakukan penalaan diharapkan akan diperoleh kinerja sistem yang lebih baik. Model respon yang dihasilkan mungkin tidak match dengan yang diharapkan, tetapi hal ini lebih praktis daripada memakai sistem coba-coba (trial and error).

Pada referensi yang lain, misalnya referensi [12] yang ditulis oleh V. Easton dijelaskan tentang sistem eksitasi pada turbo generator besar. Untuk referensi [9] yang ditulis oleh Katsuhiko Ogata dijelaskan tentang teori-teori tentang teknik respon frekuensi dan teori-teori dalam menggambarkan Bode diagram. Untuk referensi yang lain, berisikan pembahasan-pembahasan yang berkaitan dengan teori dasar yang menunjang penyelesaian tugas akhir.

### 1.3 PEMBAHASAN DAN BATASAN MASALAH

Dalam studi penalaan parameter sistem eksitasi dilakukan pembahasan dan batasan masalah antara lain :

1. Dalam tugas akhir ini dicoba dibahas dua model sistem eksitasi yang berbeda, yaitu model sistem eksitasi DC 1 dan model sistem eksitasi AC 1. Dimana masing-masing model tersebut akan ditala dengan menggunakan tipe sistem eksitasi yang berbeda, yaitu model DC 1 ditala dengan tipe filter lag-lead dan model AC 1 ditala dengan tipe umpan balik kecepatan (rate feedback).
2. Rumusan yang dipergunakan untuk menala parameter sistem eksitasi yang digunakan diperoleh langsung dari literatur yang diturunkan dari diagram Bode dari dua tipe sistem eksitasi yang ada dan merupakan standar IEEE [10].
3. Dalam simulasi data yang dipakai diambil dari referensi [10] IEEE dan generator hanya diwakilkan dengan time konstan  $T'_{do}$ .

### 1.4 METODOLOGI

Metodologi yang dipakai dalam membahas permasalahan ini adalah studi literatur mengenai generator sinkron, sistem eksitasi (dari perkembangan sistem eksitasi sampai tipe-tipe sistem eksitasi yang telah dimodelkan dalam model matematis) yang kemudian dilanjutkan dengan algoritma perhitungan serta pengumpulan data-data yang diperlukan dan yang terakhir adalah penulisan laporan.

## **1.5 SISTEMATIKA PEMBAHASAN**

Isi dari tugas akhir ini secara keseluruhan terdiri dari lima bab. Sistematika pembahasan disusun sedemikian rupa agar seluruh pembahasan terstruktur dan terarah, sebagai berikut :

### **Bab I : Pendahuluan**

Pada bab ini berisi latar belakang, tinjauan pustaka, permasalahan dan batasan masalah, metodologi, sistematika pembahasan, tujuan dan relevansi.

### **Bab II : Teknik Respon Frekuensi dan Kontrol Sistem Eksitasi Untuk Kestabilan Sistem Tenaga Listrik**

Pada bab ini berisi tentang dasar-dasar teknik respon frekuensi , yaitu dari diagram Bode, pendekatan respon frekuensi pada desain sistem kontrol, jenis-jenis kestabilan, diagram blok mesin sinkron tunggal, kriteria kinerja sinyal kecil serta penalaan sistem eksitasi.

### **Bab III : Pemodelan dan Penalaan Parameter Sistem Eksitasi**

Pada bab ini berisi tentang perkembangan sistem eksitasi, parameter sistem eksitasi, model-model sistem eksitasi, penentuan rumus-rumus penalaan parameter sistem eksitasi serta reduksi model sistem eksitasi menjadi salah satu dari dua tipe yang ada.

**Bab IV : Algoritma Perhitungan**

Pada bab ini berisi penentuan model yang disimulasikan, perhitungan terhadap parameter-parameter sistem eksitasi, hasil simulasi dari perhitungan serta analisis.

**Bab V : Penutup**

Berisi kesimpulan dan saran-saran

**I.6 TUJUAN DAN RELEVANSI**

Dari penulisan tugas akhir ini diharapkan menghasilkan kontribusi, yaitu dilihat dari aplikasi dan dilihat dari segi manfaat, yaitu :

1. Penalaan terhadap parameter sistem eksitasi dengan metode respon frekuensi akan mempersingkat pengecekan data sistem eksitasi sehingga kestabilan dapat dicapai dengan cepat.
2. Kemampuan sistem eksitasi dalam usaha mengatasi akibat yang timbul pada sistem tenaga listrik setelah terjadi gangguan.
3. Sebagai langkah untuk memperbaiki kinerja dinamik sistem tenaga listrik.

## **BAB II**

### **TEKNIK RESPON FREKUENSI DAN KONTROL SISTEM EKSITASI UNTUK KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

---

#### **2.1 TEKNIK RESPON FREKUENSI**

Respon frekuensi adalah respon keadaan tunak suatu sistem terhadap masukan sinusoida. Teknik respon frekuensi merupakan teknik yang paling konvensional untuk analisa dan desain sistem kontrol<sup>1</sup>. Frekuensi sinyal masukan dirubah dalam suatu daerah frekuensi tertentu dan mempelajari respon yang dihasilkan.

Kriteria kestabilan Nyquist akan memungkinkan untuk menyelidiki kestabilan mutlak maupun relatif sistem-sistem linier loop tertutup dari karakteristik respon frekuensi loop terbukanya. Dalam menggunakan kriteria kestabilan ini, kita tidak perlu menggunakan akar-akar persamaan karakteristik. Ini merupakan satu kelebihan dari pendekatan respon frekuensi. Kelebihan lainnya adalah bahwa pengujian respon frekuensi pada umumnya sederhana dan dapat dilakukan secara teliti dengan menggunakan pembangkit sinyal sinusoida. Disamping itu pendekatan respon frekuensi mempunyai kelebihan bahwa suatu sistem dapat didesain sedemikian rupa sehingga pengaruh yang tidak diinginkan dapat diabaikan. Analisis dan desain semacam ini dapat diperluas ke sistem kontrol non linear.

---

<sup>1</sup> KATSUHIKO OGATA, TEKNIK KONTROL AUTOMATIK, Erlangga, Vol. 2, Jakarta, 1993, hal 1

Meskipun respon frekuensi suatu sistem kontrol memberikan gambaran kuantitatif mengenai respon transient, tetapi korelasi antara respon frekuensi dan transient adalah tidak langsung, kecuali untuk sistem orde kedua. Dari korelasi tidak langsung antara beberapa ukuran respon transient dan respon frekuensi, maka pendekatan respon frekuensi dapat digunakan sedemikian rupa sehingga diperoleh hasil yang baik. Desain sistem kontrol dengan pendekatan ini didasarkan pada interpretasi karakteristik dinamik dalam bentuk karakteristik respon frekuensi. Analisis sistem kontrol semacam ini menunjukkan secara grafis perubahan yang harus dilakukan pada fungsi alih loop terbuka agar diperoleh karakteristik respon transient yang diinginkan.

### 2.1.1 Diagram Logaritmik

Fungsi alih sinusoida yang merupakan suatu fungsi kompleks dari frekuensi  $\omega$ , dicirikan oleh besar dan sudut fasa, dengan frekuensi sebagai parameter. Ada tiga jenis penyajian yang biasa digunakan untuk fungsi alih sinusoida<sup>2</sup>. Penyajian ini adalah :

1. Diagram Bode
2. Diagram polar
3. Diagram log besar terhadap fasa

---

<sup>2</sup> ibid, hal 7.

### 2.1.1.1 Diagram Bode

Fungsi alih sinusoida dapat disajikan dengan dua diagram yang terpisah, satu merupakan diagram besar terhadap frekuensi dan yang satunya lagi merupakan diagram sudut fasa terhadap frekuensi. Diagram logaritmik atau diagram Bode terdiri dari dua buah grafik, yaitu diagram dari logaritme besar fungsi alih sinusoida serta diagram sudut fasa. Keduanya digambar terhadap frekuensi dalam skala logaritmik. Penyajian standar besar logaritmik dari  $G(j\omega)$  adalah  $20 \log|G(j\omega)|$ , dimana basis dari logaritme tersebut adalah 10. Satuan yang digunakan dalam penyajian tersebut adalah decibel, biasanya disingkat db.

Kelebihan utama penggunaan diagram logaritmik adalah bahwa perkalian dapat diubah menjadi penjumlahan. Selanjutnya terdapat suatu metode sederhana untuk membuat sketsa kurva log-besar pendekatan. Metode ini didasarkan pada pendekatan asimtotik. Pendekatan dengan garis-garis asimtot tersebut adalah cukup jika hanya diperlukan informasi kasar karakteristik respon frekuensi. Jika diperlukan kurva eksak, maka dapat dilakukan koreksi secara mudah pada asimtotik-asimtotik dasar.

Penyajian logaritmik berguna dalam menunjukkan karakteristik fungsi alih baik pada frekuensi rendah maupun pada frekuensi tinggi dalam satu diagram. Perluasan daerah frekuensi rendah dengan menggunakan skala logaritmik untuk frekuensi adalah sangat menguntungkan karena karakteristik frekuensi rendah pada sistem praktis adalah sangat penting.



Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa keunggulan utama dalam menggunakan diagram logaritmik adalah dalam hal kemudahan relatif untuk menggambar kurva respon frekuensi.

Faktor-faktor dasar yang sangat sering terdapat pada suatu fungsi alih sembarang  $G(j\omega)H(j\omega)$ <sup>3</sup> adalah :

1. Penguatan K
2. Faktor integral dan turunan  $(j\omega)^{\mp 1}$
3. Faktor orde pertama  $(1 + j\omega T)^{\mp 1}$
4. Faktor kuadratik  $\left[1 + 2\zeta(j\omega / \omega_n) + (j\omega / \omega_n)^2\right]^{\mp 1}$

Setelah kita mengenal diagram logaritmik dari faktor-faktor dasar, maka kita dapat menggunakannya dalam menyusun diagram logaritmik gabungan untuk setiap bentuk umum  $G(j\omega)H(j\omega)$  dengan membuat sketsa kurva untuk setiap faktor dan menjumlah kurva-kurva individual ini secara grafis, karena menjumlah logaritma penguatan berkaitan dengan mengalikannya. Sebagai contoh ditunjukkan oleh persamaan fungsi alih seperti di bawah, serta gambar diagram Bodanya dapat dilihat pada gambar 2.1.

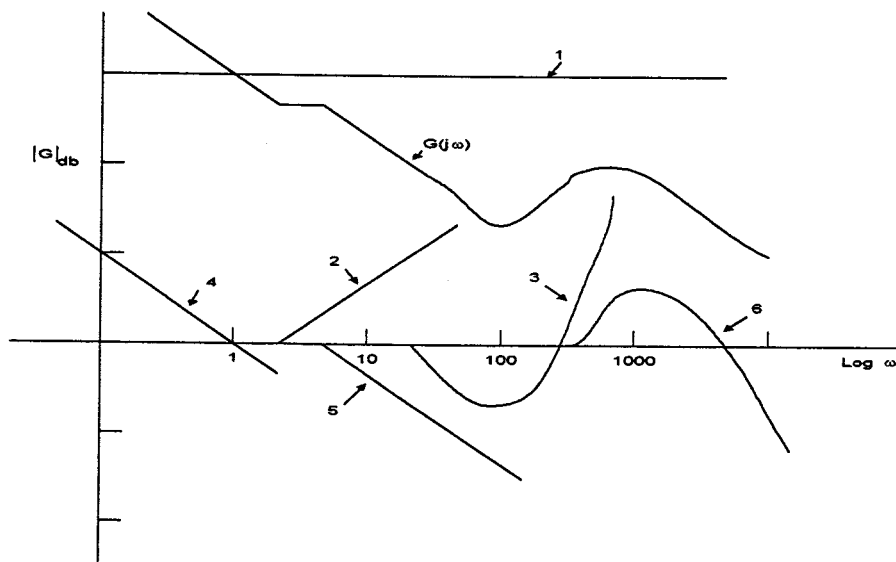
$$G(j\omega) = \frac{K(1 + T_z j\omega)(\omega_{nz}^2 - \omega^2 + j\omega 2\zeta_z \omega_{nz})}{(j\omega)^n (1 + T_p j\omega)(\omega_{np}^2 - \omega^2 + j\omega 2\zeta_p \omega_{np})} \quad (2.1)$$

---

<sup>3</sup> ibid, hal. 8.

$$20 \log |G| = 20 \log K - n 20 \log \omega - 20 \log |1 + T_p j\omega| + 20 \log |1 + T_z j\omega|$$

$$- 20 \log |\omega_{np}^2 - \omega^2 + j\omega 2\zeta_p \omega_{np}| + 20 \log |\omega_{nz}^2 - \omega^2 + j\omega 2\zeta_z \omega_{nz}| \quad (2.2)$$



**Gambar 2.1** Bode plot  $|G|$  pada fungsi alih persamaan (2.2)

dimana :  $1 = |K|$

$$2 = |1 + T_z j\omega|$$

$$3 = |\omega_{nz}^2 - \omega^2 + j\omega 2\zeta_z \omega_{nz}|$$

$$4 = 1/|j\omega|$$

$$5 = 1/|1 + T_p j\omega|$$

$$6 = 1/|\omega_{np}^2 - \omega^2 + j\omega 2\zeta_p \omega_{np}|$$

### 2.1.1.2 Diagram Polar

Diagram polar suatu fungsi alih sinusoida  $G(j\omega)$  adalah suatu diagram besar dari  $G(j\omega)$  terhadap sudut fasa dari  $G(j\omega)$  pada koordinat polar jika  $\omega$  diubah dari nol sampai tak terhingga. Jadi diagram polar merupakan tempat kedudukan vektor  $|G(j\omega)|\angle G(j\omega)$  jika  $\omega$  diubah dari nol sampai tak terhingga. Diagram polar sering disebut diagram Nyquist. Untuk menggambar diagram polar, baik besar  $|G(j\omega)|$  maupun sudut fasa  $\angle G(j\omega)$  harus dihitung secara langsung untuk setiap frekuensi  $\omega$ .

Suatu keuntungan penggunaan diagram polar adalah bahwa diagram ini melukiskan karakteristik respon frekuensi suatu sistem di seluruh daerah frekuensi pada satu diagram. Satu kelemahannya adalah bahwa diagram ini tidak secara jelas menunjukkan kontribusi tiap-tiap faktor fungsi alih loop terbuka.

### 2.1.1.3 Diagram Log Besar Terhadap Sudut Fasa

Metode lain untuk menggambarkan karakteristik respon frekuensi secara grafis adalah menggunakan diagram log-besar terhadap fasa, yang merupakan suatu diagram besar logaritmik dalam decibel terhadap sudut fasa atau fasa margin untuk suatu daerah frekuensi yang ditinjau. Kurva ini diberi skala  $\omega$ . Diagram log-besar terhadap fasa semacam ini sering disebut diagram Nichols.

Pada diagram Bode, karakteristik respon frekuensi dari  $G(j\omega)$  ditunjukkan pada kertas semilog dengan dua kurva yang terpisah, yaitu kurva log-besar dan kurva sudut fasa, sedangkan dalam diagram log-besar

terhadap fasa, dua buah kurva pada diagram Bode digabung menjadi satu. Diagram log-besar terhadap fasa dapat digambar secara mudah dengan membaca harga-harga log-besar dan sudut fasa dari diagram Bode.

Keunggulan diagram log-besar terhadap fasa adalah bahwa kestabilan relatif sistem loop tertutup dapat ditentukan secara cepat dan kompensasi dapat diselesaikan secara mudah.

### **2.1.2 Pendekatan Respon Frekuensi Pada Desain Sistem Kontrol**

Dalam penyelesaian persoalan kompensasi sistem kontrol dengan teknik-teknik wawasan frekuensi, sehingga diperoleh perilaku respon transient dalam bentuk spesifikasi wawasan frekuensi seperti margin fasa, margin penguatan, harga puncak resonansi dan lebar pita. Desain dalam wawasan frekuensi adalah tidak langsung karena sistem didesain untuk memenuhi spesifikasi wawasan frekuensi bukan spesifikasi wawasan waktu. Setelah loop terbuka selesai didesain dengan metode respon frekuensi, maka pole-pole dan zero-zero loop tertutup dapat diperoleh. Karakteristik respon transient harus dicek untuk melihat apakah sistem yang telah didesain memenuhi persyaratan dalam wawasan waktu atau tidak. Jika tidak, maka kompensator tersebut harus dimodifikasi dan analisisnya diulang sampai diperoleh hasil yang memuaskan.

Desain dalam wawasan frekuensi adalah sederhana dan mudah. Diagram respon frekuensi secara jelas menunjukkan cara yang harus dilakukan untuk memodifikasi sistem, walaupun prediksi kuantitatif secara eksak dari karakteristik

respon transient tidak dapat dilakukan. Pendekatan respon frekuensi dapat diterapkan pada sistem yang komponen karakteristik dinamikanya diberikan dalam bentuk data respon frekuensi. Diagram respon frekuensi yang diperoleh secara eksperimental dapat digabungkan secara mudah dengan diagram lain yang sejenis. Perhatikan juga bahwa dalam memperhitungkan noise frekuensi tinggi ternyata pendekatan respon frekuensi lebih mudah dari pendekatan lain. Dalam mendesain sistem kontrol dalam wawasan frekuensi, jika diinginkan suatu phasa margin atau margin penguatan tertentu, diagram Bode lebih mudah daripada diagram polar (Dalam menggunakan diagram Bode, jika kurva eksak tidak banyak berbeda dengan asimtot-asimtot garis lurus di dekat *gain crossover frekuensi*, maka diagram asimtotik tersebut dapat digunakan untuk tujuan desain<sup>4</sup>).

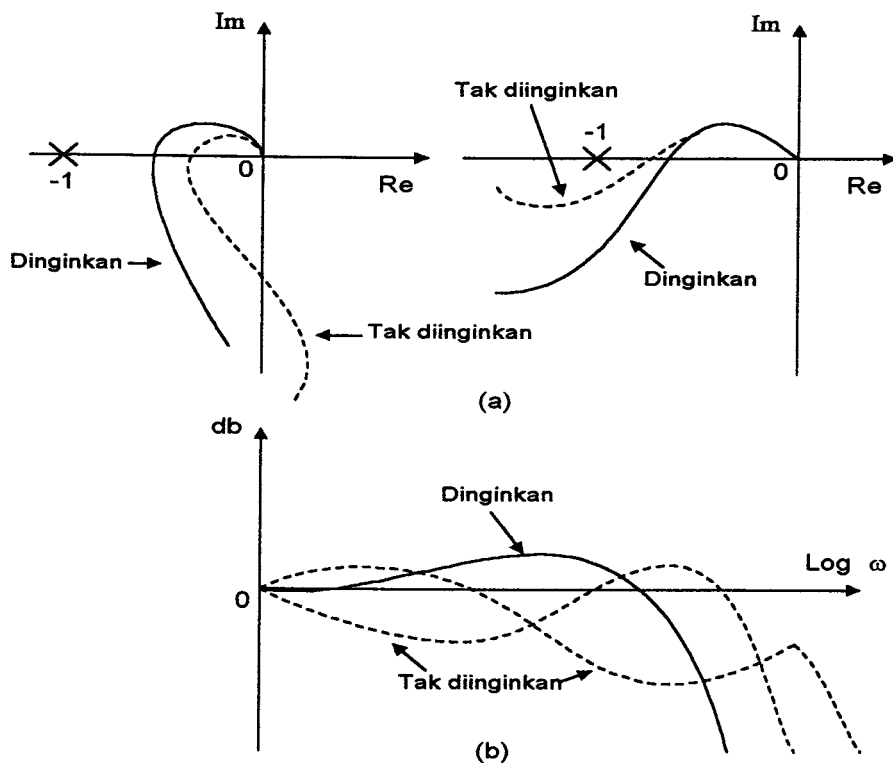
Dapat dikatakan bahwa, dalam beberapa kasus praktis kompensasi merupakan perpaduan kesalahan keadaan tunak dan kestabilan relatif. Agar diperoleh harga koefisien kesalahan kecepatan yang tinggi dan sekaligus memenuhi kestabilan relatif, maka perlu dibentuk kembali kurva respon frekuensi lup terbuka.

Penguatan pada daerah frekuensi rendah harus cukup besar sedangkan didekat *gain crossover frekuensi*, kemiringan log-besar pada diagram Bode harus sama dengan - 20 db/dekade. Kemiringan ini harus dipertahankan pada pita frekuensi yang cukup lebar untuk menjamin phasa margin yang baik. Pada daerah frekuensi tinggi, penguatan harus diredam secepat mungkin untuk meminimumkan noise frekuensi tinggi.

---

<sup>4</sup> ibid, hal. 118.

Contoh-contoh kurva respon frekuensi ditunjukkan pada gambar 2.2.

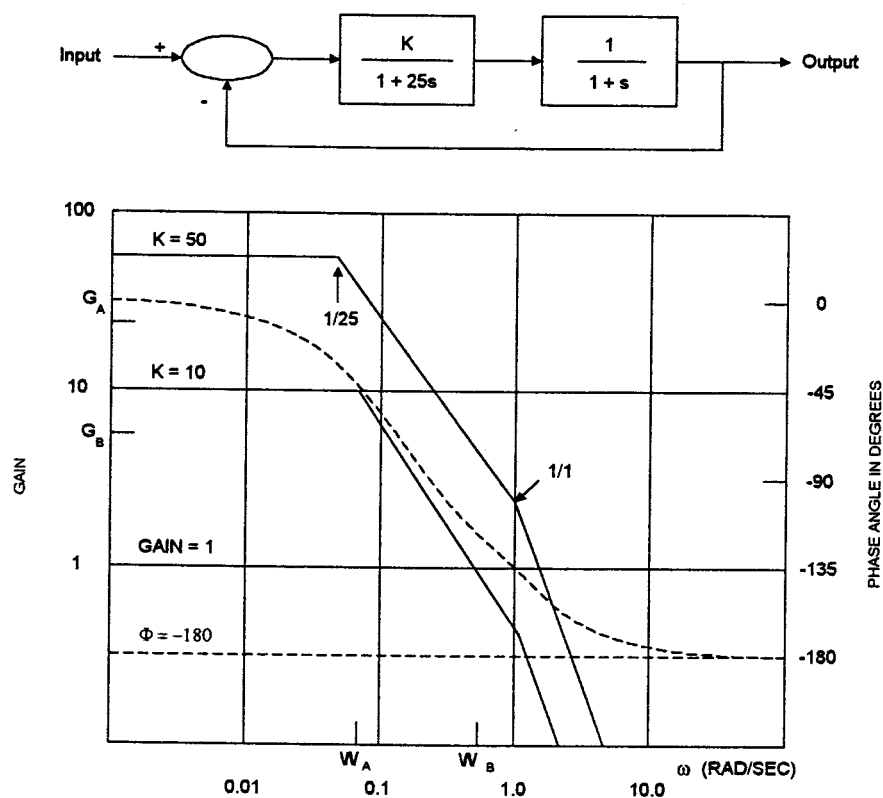


**Gambar 2.2** (a) Contoh--contoh kurva respon frekuensi loop terbuka yang diinginkan dan tak diinginkan; (b) Contoh--contoh kurva respon frekuensi loop tertutup yang diinginkan dan tak diinginkan.

### 2.1.3 Teknik Respon Frekuensi Sebagai Kontrol Penalaan Sistem

Seperti telah dijelaskan di atas bahwa respon frekuensi merupakan keadaan tunak suatu sistem terhadap masukan sinusoida, dimana frekuensi sinyal masukan diubah dalam satu daerah frekuensi tertentu, kemudian mempelajari respon frekuensi yang dihasilkan. Sehingga teknik respon frekuensi dipakai dasar untuk pengaturan atau penalaan sebuah kontrol sistem.

Sebagai contoh dapat dilihat pada gambar 2.3, yaitu sebuah blok diagram gain asimtot loop terbuka dan diagram fasa untuk sistem umpan balik orde dua yang sederhana.

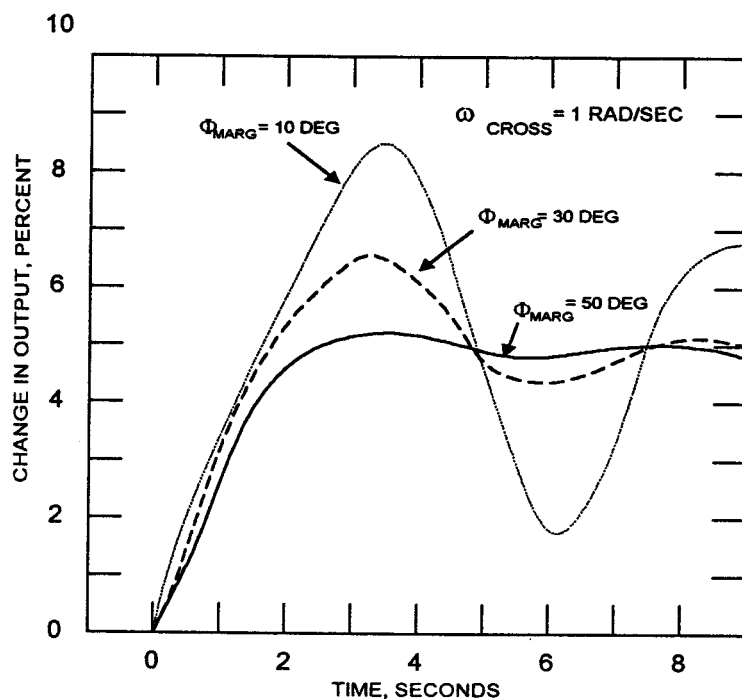


**Gambar 2.3** Sistem umpan balik orde ke dua

Dari gambar 2.3, dapat diambil suatu observasi yang menarik, yaitu hubungan antara gain dan frekuensi pada slope  $-1/1$ .

$$\log(G_A) - \log(G_B) = \log(\omega_B) - \log(\omega_A)$$

$$\log \frac{G_A}{G_B} = \log \frac{\omega_B}{\omega_A}$$



**Gambar 2.4** Step respon sebagai fungsi phasa margin (dengan input 5 %)

Pada umumnya penalaan nilai  $K$  dalam gambar 2.4, dan umumnya penalaan dari semua loop kontrol adalah suatu kerjasama diantara kecepatan (frekuensi crossover yang tinggi, nilai  $K$  yang tinggi) dan stabilitas (phasa margin yang tinggi, nilai  $K$  yang rendah). Phasa margin dalam batas 50-60 biasanya merupakan persetujuan yang tepat<sup>5</sup> (gambar 2.4).

Diberikan pemisahan dalam breakpoint pada gambar 1, kerjasama tertentu akan terjadi crossover pada frekuensi dibawah break ke dua , misalnya  $1/(2T_2)$  rad/sec. Ingat sifat  $-1/1$ , akan mendapatkan nilai  $K$  :

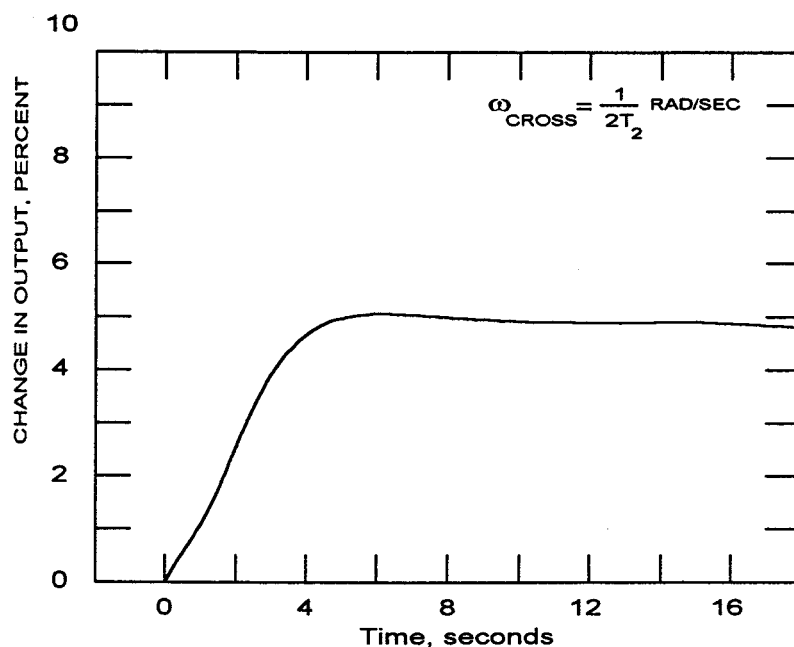
<sup>5</sup> RODOLFO J. KOESSLER, TECHNIQUES FOR TUNING EXCITATION SYSTEM PARAMETERS, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, Vol. 3, No. 4, December 1988, hal 785.



$$K = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{25}{2 \cdot 1} = 12,5$$

Respon yang diharapkan akan diredam dengan baik dengan ekivalen time konstan

$1/\omega_c = 2$  detik, dan hasilnya ditunjukkan oleh gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Step respon dari sistem pada gambar 2.3  
jika  $K = 12,5$  (dengan input 5 %)

## 2.2 KONTROL SISTEM EKSITASI UNTUK KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Phenomena stabilitas pengoperasian mesin sinkron telah mendapat perhatian besar pada masa lalu dan akan mendapat perhatian meningkat pada masa depan. Dengan ekonomis pada desain sistem mencapai ukuran unit yang lebih besar dan lebih tinggi persatuan pembangkitan dan desain transmisi, peningkatan yang

lebih dan ketergantungan ditempatkan pada pengontrolan untuk menyediakan efek kompensasi yang diinginkan dan dengan ini menghilangkan reduksi margin stabilitas inheren dari desain perangkat tersebut.

Bersamaan dengan ini juga ditingkatkan metode perhitungan dan kemampuan menghitung dan juga kemungkinan peramalan efek dinamis kompleks, menyediakan alat untuk mendesain peralatan kontrol dengan karakteristik yang memadai.

Diantara beberapa aspek stabilitas pengoperasian mesin sinkron, yang penting adalah mode dari gangguan kecil pada stabilitas atau dikenal sebagai steady-state baik dinamis maupun kondisional stability. Akhir-akhir ini perhatian lebih ditingkatkan pada efek kontrol eksitasi dari peredaman eksitasi yang mengkarakteristik phenomena stabilitas dan telah ditemukan sinyal penstabil transient yang diturunkan dari persamaan kecepatan, frekuensi terminal daya disuperposisikan pada tegangan normal dari sinyal error dari regulator tegangan untuk menyediakan damping tambahan untuk osilasi ini.

### **2.2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik**

Secara umum kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan reaksi suatu sistem tenaga listrik terhadap gangguan pada keadaan operasi normal dan usaha untuk mengembalikan keadaan setelah gangguan tersebut kembali menjadi normal.

Studi kestabilan biasanya digolongkan ke dalam 3 (tiga) jenis, bergantung pada sifat dan besarnya gangguan<sup>6</sup>, yaitu :

- a. **Studi kestabilan peralihan** (*transient*),
- b. **Studi kestabilan dinamik**
- c. **Studi kestabilan keadaan mantap** (*steady-state*).

Studi kestabilan peralihan bertujuan untuk menentukan apakah suatu sistem akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan berat, seperti gangguan sistem transmisi, perubahan beban yang mendadak, pemutusan unit pembangkitan, atau pengoperasian penghubung (switching).

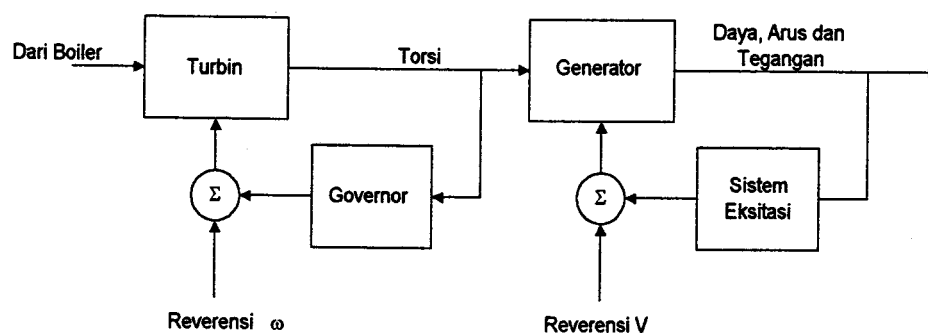
Studi kestabilan dinamik dan keadaan mantap memiliki ruang lingkup yang tidak terlalu luas, menyangkut satu atau beberapa mesin yang mengalami perubahan keadaan kerja secara perlahan-lahan atau berangsur-angsur. Oleh karena itu, kedua studi ini menyangkut kestabilan letak kedudukan (locus) dari titik kerja sistem. Antara studi kestabilan dinamik dengan kestabilan keadaan mantap pada dasarnya mempunyai sifat masalah yang sama, perbedaannya adalah studi kestabilan dinamis, sistem penguatan (eksitasi) dan sistem governor-turbin dilukiskan pula bersama-sama model mesin serempak, sedangkan masalah kestabilan keadaan mantap menggunakan model generator yang sangat sederhana yang memperlakukan generator tersebut sebagai sumber tegangan yang konstan.

Dalam studi kestabilan, untuk mengetahui apakah sistem tenaga listrik masih stabil atau tidak setelah adanya gangguan atau perubahan keadaan sistem,

---

<sup>6</sup> STEVENSON, W.D, ANALISIS SISTEM TENAGA LISTRIK, Erlangga, Edisi keempat, Jakarta, 1994, hal.349

diamati melalui variabel-variabel keadaan sistem sebagai indikator ketidakstabilan, antara lain sudut rotor atau frekuensi dan tegangan. Jika terjadi perubahan permintaan di sisi beban pada suatu sistem tenaga listrik, maka akan terjadi perubahan pada tegangan dan frekuensi sistem. Perubahan ini akan menyebabkan pengendali (controller) mengatur kembali besaran-besaran input guna mencapai titik kesetimbangan baru. Letak pengendali ada pada sisi pembangkit. Bila digambarkan secara diagram blok, posisi pengendali tersebut dapat dilihat pada gambar 2.6 yang memperlihatkan proses transfer energi dari uap/air menjadi besaran elektrik seperti daya, arus dan tegangan.



**Gambar 2.6** *Diagram Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik*

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa energi mekanik berupa putaran turbin oleh energi yang dibawa oleh air (pada PLTA) atau uap (pada PLTU), memutar generator untuk menghasilkan energi listrik.

Governor adalah pengendali yang berfungsi untuk menstabilkan nilai torsi mekanik yang menjadi masukan bagi generator. Bila ada perubahan putaran,

governor berfungsi sebagai umpan balik untuk mencapai nilai kesetimbangan baru. Sistem eksitasi adalah pengendali yang berfungsi untuk mengontrol keluaran generator seperti daya, arus dan tegangan. Bila terjadi perubahan pada besaran-besaran tersebut, maka eksitasi akan berfungsi sebagai umpan balik untuk mencapai nilai kesetimbangan baru.

### 2.2.2 Diagram Blok Mesin Sinkron Tunggal

Dinamika mesin sinkron tunggal menggambarkan prinsip bekerjanya generator untuk menghasilkan energi listrik terhadap masukan-masukan yang diterimanya. Untuk menghasilkan energi listrik, mula-mula generator mendapatkan dua masukan antara lain :

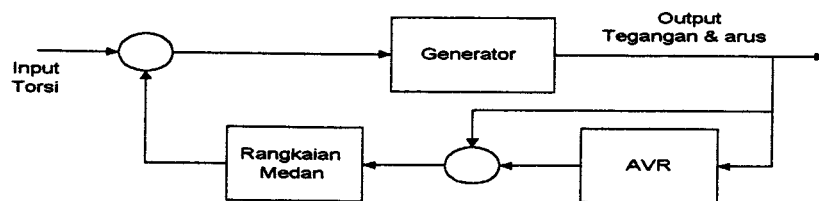
- a. Torsi mekanik dari turbin, yaitu torsi yang dihasilkan oleh turbin yang digerakkan oleh energi dari media air atau uap, kemudian memutar rotor generator sinkron.
- b. Fluksi magnetik ( $\phi$ ) dari rangkaian medan. Kumparan penghasil fluksi  $\phi$  dari rangkaian medan terletak pada rotor generator sinkron, sehingga medan fluksi ini ikut berputar.

Dari kedua masukan tersebut, fluksi putar yang dihasilkan rotor akan memotong kumparan stator, yang menimbulkan tegangan di ujung-ujung kumparan stator. Besar tegangan ini sebanding dengan kecepatan putar poros  $n$ , fluksi  $\phi$ , dan konstanta pembanding  $C$ . Sehingga dapat dituliskan dalam persamaan matematis tegangan belitan stator  $E$  linier terhadap fluks  $\phi$  sebagai berikut :

$$E = C \cdot n \cdot \phi \quad (2.3)$$

Bila generator dibebani, akan mengalir arus jangkar dari generator ke beban. Arus jangkar ini akan menimbulkan torsi elektrik akibat fluks yang dihasilkan oleh kumparan jangkar di stator. Torsi elektrik ini berlawanan terhadap torsi mekanik yang dihasilkan fluks dari kumparan rotor. Pada keadaan tunak, penjumlahan antara torsi elektrik dan torsi mekanik sama dengan nol. Pada saat ini generator akan berputar pada kecepatan tetap yang dinamakan kecepatan sinkron. Namun sebelum mencapai kondisi tunak, ada masa transient, yaitu terjadi ketidakseimbangan torsi. Ketidakseimbangan torsi menimbulkan percepatan atau perlambatan pada kecepatan rotor generator sinkron. Ketidakseimbangan ini disebut juga ayunan ( swing ).

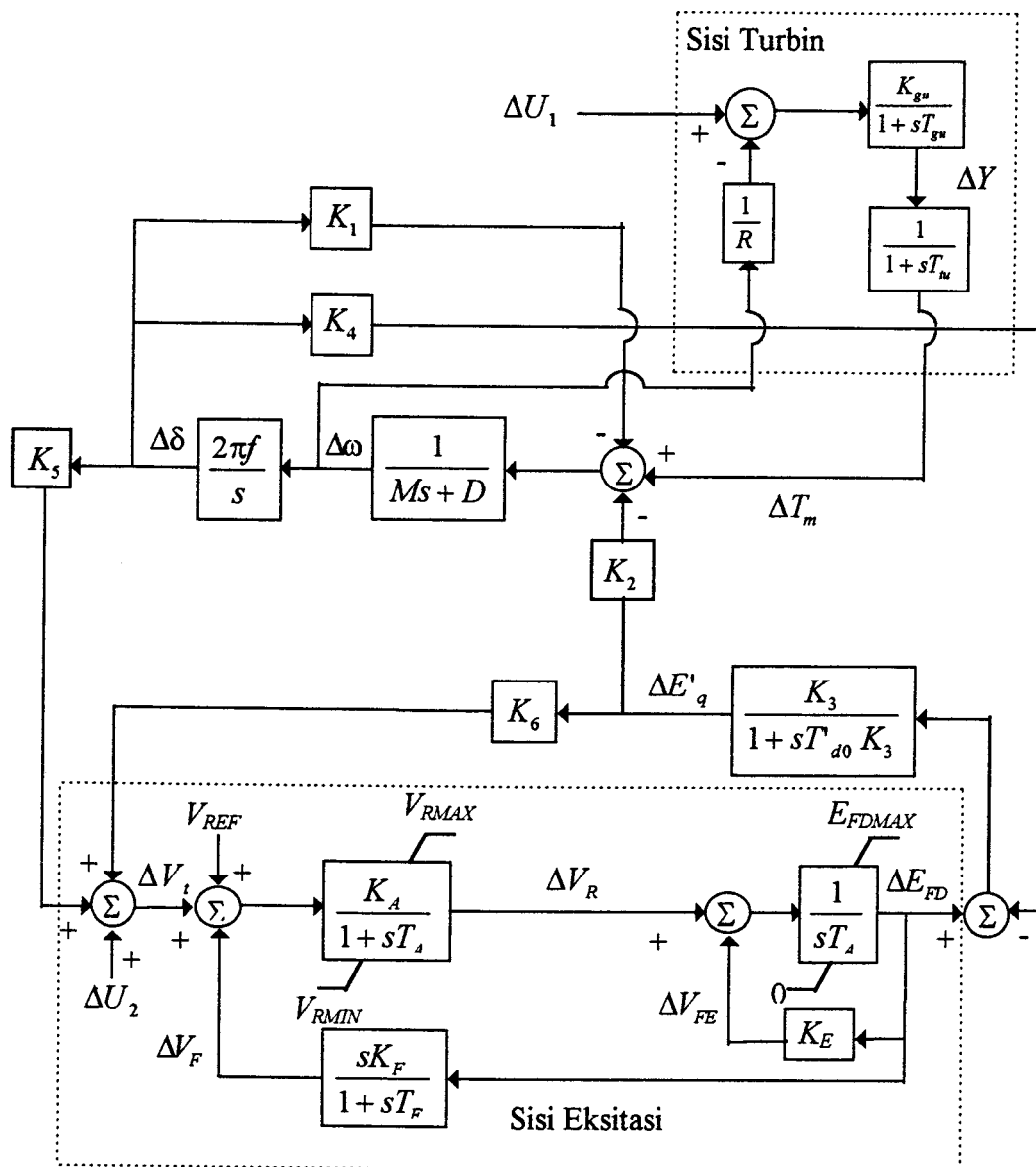
Penambahan beban bagi generator menimbulkan pengurangan fluksi yang dihasilkan oleh rangkaian kumparan medan, ini disebut reaksi jangkar, selain itu penambahan beban juga mengakibatkan turunnya tegangan terminal generator. Untuk mempertahankan nilai fluksi dan tegangan terminal generator, dipasang rangkaian eksitasi berupa AVR ( Automatic Voltage Regulator ), yang berfungsi membandingkan antara tegangan yang diinginkan dengan tegangan sebenarnya. Selisih kedua tegangan inilah yang digunakan oleh AVR untuk mengatur rangkaian medan agar didapat nilai dan fluksi yang konstan. Berikut dapat digambarkan diagram blok generator sinkron dan sistem eksitasi pada gambar 2.7.



**Gambar 2.7** *Diagram Blok Generator Sinkron dan Sistem Eksitasi*

Dari fenomena-fenomena di atas dapat dinyatakan dalam persamaan-persamaan matematik dan disusun bentuk diagram blok. Model dinamik mesin sinkron tunggal yang dihubungkan pada bus infinit tersebut, mengacu pada model yang diturunkan oleh F.P. DeMello dan C. Concordia (lihat gambar 2.8). Parameter-parameter dari model tersebut yaitu  $K_1$  sampai  $K_6$ , dimana besarnya tergantung pada kondisi pembebanan dan keadaan jaringan. Parameter-parameter tersebut didefinisikan sebagai berikut :

1.  $K_1$  menyatakan perubahan torsi elektrik terhadap perubahan di dalam sudut rotor dengan fluks linkage.
2.  $K_2$  menyatakan perubahan torsi elektrik terhadap perubahan fluks linkage di dalam sumbu d dengan sudut rotor yang konstan.
3.  $K_3$  menyatakan keadaan dimana reaktansi  $X_d$  kecil.
4.  $K_4$  menyatakan efek demagnetisasi dari perubahan sudut rotor.
5.  $K_5$  menyatakan perubahan tegangan terminal terhadap perubahan sudut rotor dengan  $E'_q$  yang konstan.
6.  $K_6$  menyatakan perubahan tegangan terminal terhadap  $E'_q$  dengan sudut rotor yang konstan.

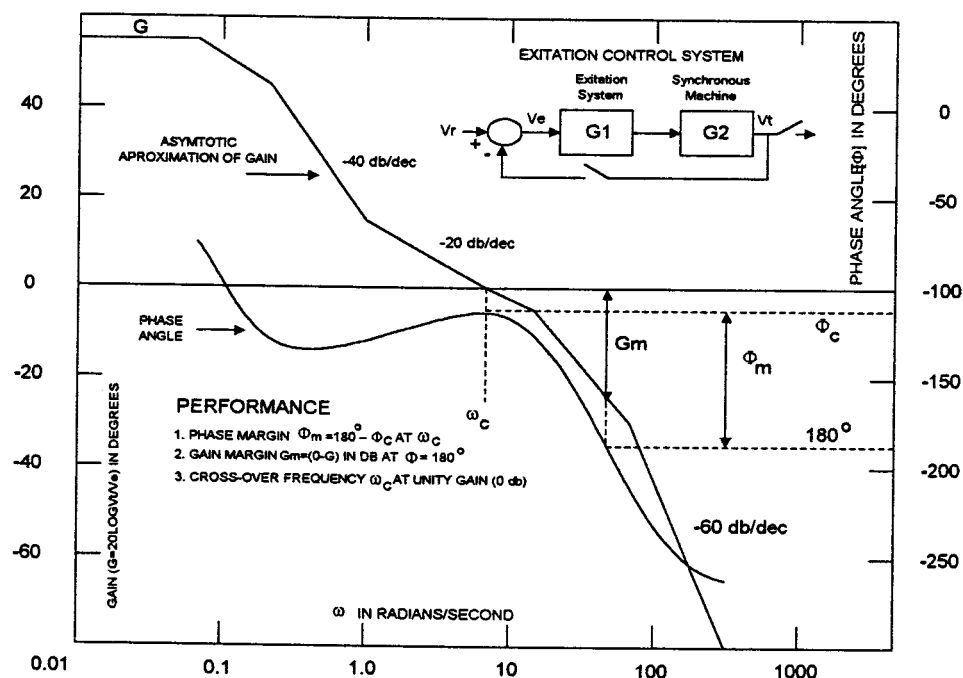


**Gambar 2.8** Model Sistem Eksitasi Pada mesin tunggal

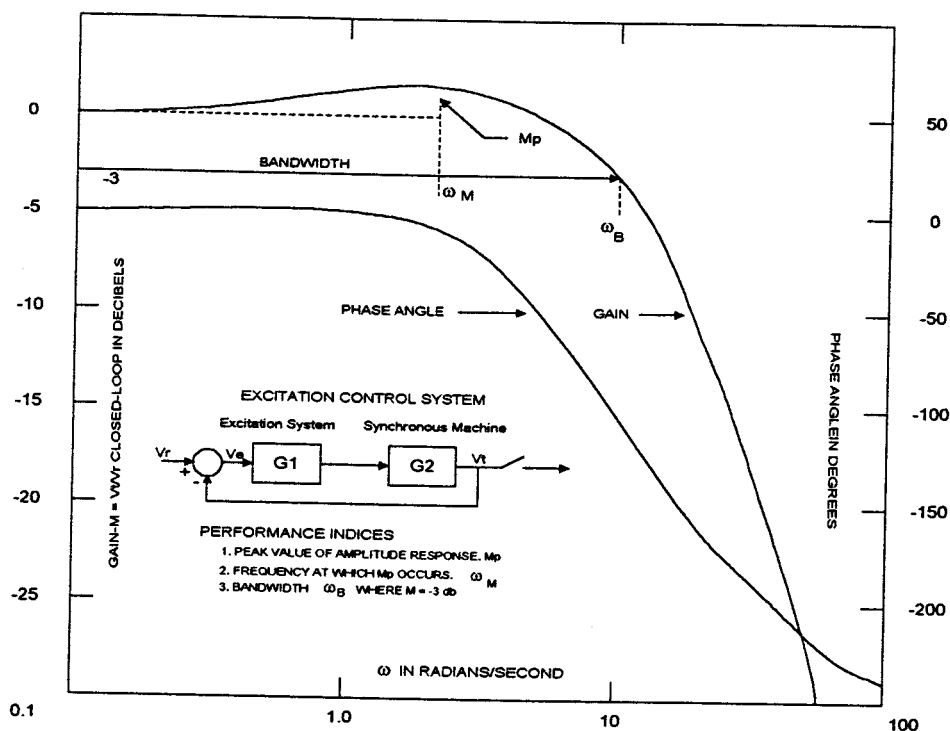


### 2.2.3 Kriteria Kinerja Sinyal Kecil

Kinerja sinyal kecil pada sistem kontrol eksitasi, sistem eksitasi atau komponen dari sistem eksitasi merupakan respon sinyal yang cukup kecil, dimana kenonlinearan dapat diabaikan dan operasi sistem dapat dianggap linear. Kinerja sinyal kecil dari sebuah sistem atau komponen-komponennya dapat digambarkan dalam bentuk parameter real time (respon transient) dalam bentuk gangguan sinyal besar atau dalam bentuk gain, sudut fasa dan frekuensi yang diperoleh dari grafik respon frekuensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9 dan 2.10.



**Gambar 2.9** Respon frekuensi loop terbuka dari sistem kontrol eksitasi dengan mesin sinkron rangkaian terbuka



**Gambar 2.10** Respon frekuensi loop tertutup dari sistem kontrol eksitasi dengan mesin sinkron rangkaian terbuka

Pada gambar 2.9 prinsip karakteristik yang diperhatikan adalah gain frekuensi  $G$  yang rendah, frekuensi crossover  $\omega_c$ , fasa margin  $\phi_m$  dan gain margin  $G_m$ . Sedangkan pada gambar 2.10 parameter-parameter yang diperhatikan adalah lebar pita  $\omega_B$ , waktu puncak  $M_p$  dari karakteristik gain dan frekuensi  $\omega_m$ . Karakteristik respon frekuensi loop terbuka berguna dalam menghitung gain dan fasa margin.

Kriteria kinerja sinyal kecil memberikan pengertian terhadap evaluasi tanggapan sistem kontrol eksitasi untuk perubahan beban, perubahan tegangan dan perubahan kecepatan rotor generator yang dihubungkan dengan ketidakstabilan

dinamik. Data kinerja sinyal kecil memberikan pengertian untuk perhitungan atau pengujian parameter model sistem eksitasi untuk studi sistem.

#### **2.2.4 Penalaan Sistem Eksitasi**

Prosedur penalaan sistem eksitasi sinyal kecil yang diberikan dalam hal ini didasarkan pada pengetesan step respon loop terbuka sistem eksitasi modern. Unit dibawa ke tegangan nominal dengan terminal generator rangkaian terbuka, dan step kecil berlaku sebagai tegangan referensi. Respon tegangan terminal dan medan dicatat. Jika respon dari loop pengatur tegangan tidak memadai (terlalu lambat atau terlalu berosilasi), enjiner lapangan mengatur kembali semua parameter sistem eksitasi yang dapat diatur, sehingga responnya memenuhi kinerja yang diharapkan.

Pada unit yang beroperasi, respon tegangan loop tertutup yang hanya dipengaruhi oleh perubahan fluk (tidak ada perubahan dalam sudut rotor) yang biasanya lebih stabil pada kondisi rangkaian terbuka. Metode pengatur ini mencoba untuk menyamai atau melebihi pengetesan selama beroperasi dengan suatu pengetesan simulasi waktu step respon rangkaian terbuka dari model matematika. Jika respon dari model tersebut sampai pengujian step samasekali tidak diharapkan, tidak tersedia data pengetesan tambahan. Enjiner sistem memodifikasi parameter-parameter dari model sistem eksitasi yang dapat diatur oleh enjiner lapangan. Meskipun model respon mungkin tidak sesuai/match dengan tepat dengan peralatan yang keluar, ini lebih praktis daripada memakai sistem coba-coba (trial and error).

### BAB III

## PEMODELAN DAN PENALAAN PARAMETER

## SISTEM EKSITASI

---

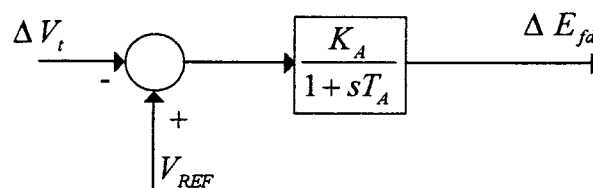
### 3.1 PENDAHULUAN

Sistem eksitasi adalah sistem yang digunakan untuk mencatu arus dc pada kumparan medannya. Sedang untuk pengaturan arus eksitasi agar didapat tegangan yang konstan digunakan AVR (Automatic Voltage Regulator). AVR ini berupa perangkat elektronik yang bertugas mengatur besar arus eksitasi dengan jalan memberikan pulsa pengatur (trigger) pada Thyristor. Adapun besar pulsa yang diberikan tergantung dari kondisi generator saat itu.

Sistem eksitasi mempunyai jenis dan pemodelan yang beragam. Tetapi fungsi dari berbagai sistem eksitasi tetap sama, yaitu mengontrol keluaran dengan mengumpanbalikkan keluaran tersebut ke rangkaian medan sehingga diharapkan keluaran tetap konstan. Input sistem eksitasi adalah tegangan terminal  $V_t$  yang kemudian dibandingkan dengan tegangan referensi  $V_{ref}$ . Pada prinsipnya sistem eksitasi terdiri dari beberapa komponen dasar, yaitu : regulator, amplifier, eksiter dan stabilizer. Regulator mengukur tegangan dan membandingkan input tegangan, amplifier menguatkan sinyal dari bagian regulator, eksiter akan mengubah arus medan penguat selanjutnya stabilizer sebagai umpan balik untuk memberikan kestabilan pada sistem eksitasi secara keseluruhan.

Blok diagram sistem eksitasi yang biasanya digunakan dalam pemodelan mesin tunggal dimodelkan secara sederhana seperti pada gambar 3.1. Dari model tersebut didapat persamaan :

$$\Delta E_{fd} = \frac{K_A}{1 + sT_A} (V_{REF} - V_t) \quad (3.1)$$



**Gambar 3.1** *Diagram Blok Rangkaian Eksitasi*

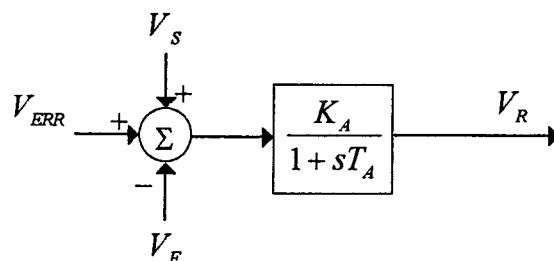
### 3.2 PARAMETER-PARAMETER SISTEM EKSITASI

Seperti telah disebutkan diatas bahwa pada prinsipnya sistem eksitasi terdiri dari beberapa komponen dasar, yaitu regulator, amplifier, eksiter dan stabilizer. Masing-masing komponen tersebut diwakilkan oleh parameter-parameter. Parameter-parameter tersebut akan diidentifikasi atau dipelajari jika output yang dihasilkan stabil atau tidak (berosilasi).

#### 3.2.1 Parameter Regulator dan Amplifier

Regulator dan amplifier merupakan penguat sinyal hasil penjumlahan dari umpan balik stabilisasi  $V_F$ , sinyal penstabil  $V_S$  dan tegangan error (selisih tegangan

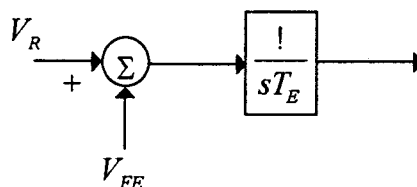
yang diinginkan dengan tegangan yang dihasilkan). Regulator dan amplifier terdiri dari time konstan  $T_A$  dan gain  $K_A$ . Output dari regulator dan amplifier ( $V_R$ ) dipakai untuk mengontrol eksiter. Blok diagramnya ditunjukkan oleh gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Blok regulator dan amplifier

### 3.2.2 Parameter Eksiter

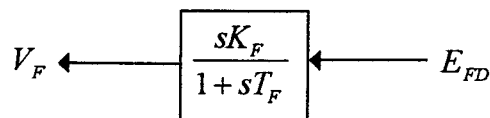
Eksiter diwakilkan dengan konstanta eksiter  $T_E$ . Eksiter yang dipakai mungkin terpisah atau mungkin berupa eksiter sendiri. Input eksiter diperoleh dari output regulator, kombinasi phasor dari tegangan dan arus terminal  $V_T$  dan  $I_T$  (tipe statis), serta terdapat sinyal proporsional  $V_{FE}$ . Blok eksiter dapat dilihat pada gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Blok eksiter

### 3.2.3 Parameter Stabilisasi

Umpan balik stabilisasi  $V_F$  merupakan output dari gain dan time konstan stabilizer sistem kontrol eksitasi  $K_F$  dan  $T_F$ . Input stabilizer diperoleh dari output eksiter  $E_{FD}$ , Blok diagram stabilisasi dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar3.4 Blok stabilisasi  $V_F$

### 3.3 PERKEMBANGAN SISTEM EKSITASI

Generator tenaga listrik memerlukan arus searah yang tereksitasi untuk sistem medannya. Eksiter DC dipakai untuk generator turbo sampai kapasitas 200 MW pada pf 0,9. Kapasitas generator terus bertambah diiringi dengan bertambahnya keperluan daya eksitasi, sehingga jelas eksiter DC bukanlah merupakan mesin terbaik yang dapat memenuhi permintaan baru untuk alasan berikut ini<sup>1</sup>:

1. Arus eksitasi yang tinggi pada tegangan rendah akan memerlukan operasi brush yang besar pada komutator eksiter. Operasi yang diinginkan menjadi sulit dicapai, sehingga harus ditambahkan komutator ekstensif dan peralatan brush gear.
2. Komutator eksiter DC tidaklah menguntungkan. Pada kondisi generator steady state, komutasi dapat dipenuhi dengan baik, tapi selang beban berubah yang

<sup>1</sup> Central Electricity Generating Board, MODERN POWER STATION PRACTICE, Pergamon Press, Oxford, 1971, Second Ed, Vol.4, hal.38

memerlukan tenaga medan yang kuat, akan menimbulkan resiko bunga api pada komutator dalam sistem respon tinggi.

3. Keandalan merupakan salah satu hal utama yang diperlukan dalam sistem eksitasi utama, khususnya bagi generator sebagai sumber listrik dalam sistem yang besar.

Alasan di atas mempercepat pengembangan sistem eksiter rectifier AC. Rectifier AC adalah merupakan bagian yang sangat diperlukan pada sistem eksitasi AC saat ini dan sekarang sedang diberikan untuk penambahan rating diode. Pada sistem eksitasi sebelumnya dipakai diode germanium, tetapi tegangan reverse maksimum sebesar 600 volt yang dapat mengeblok diode sangatlah rendah untuk mencapai keperluan akan generator yang lebih besar. Masalah ini dapat diatasi dengan memakai diode rectifier silikon yang dapat dioperasikan pada tegangan inverse 1200 volt dengan tegangan inverse puncaknya 1500 atau lebih.

Diode tidak tahan dengan tegangan lebih dan ini secara keseluruhan harus dihindari. Untuk memproteksi diode rectifier digunakan CB (Circuit Breaker) kecepatan tinggi yang mampu mengisolasi rectifier dalam 0,1 detik. Pemutus dapat didesain untuk menyesuaikan karakteristik arus yang masih ada pada diode, sehingga saat over load pemutus beroperasi sebelum diode rusak.

Perkembangan eksiter AC dengan sistem rectifier statis mengeleminasi komutator eksiter DC dan brush gear, tetapi masalahnya adalah pengumpulan arus pada slip ring generator utama. Perkembangannya sekarang bertujuan untuk menghilangkan slip ring generator dengan menggunakan sistem eksitasi rectifier



rotasi. Percobaan pada sistem eksitasi rectifier rotasi yang cocok untuk generator berkapasitas 500 MW atau lebih sudah dikembangkan.

Pengoperasian turbo generator besar pada bus infinite sangat terbatas tanpa perkembangan respon yang cepat dan metode yang akurat dari pengecekan eksitasi. Perkembangan AVR (Automatic Voltage Regulator) 20 tahun terakhir dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu :

1. AVR dengan amplifier rotasi, yaitu : amplidynes, metadynes, magnicons dan lain-lain.
2. AVR dengan amplifier magnetik.
3. AVR dengan thyristor.

Mungkin masih ada beberapa tipe AVR elektromekanik yang melayani generator kecil, tapi ini harus segera diganti dengan seluruh peralatan statis yang menyediakan voltage regulator yang cepat.

**Tabel 3.1 Daya Generator dan kebutuhan sumber Eksitasi<sup>2</sup>**

Kapasitas Generator (MW)	100	200	300	375	500
Power faktor	0,80	0,90	0,85	0,85	0,85
Tegangan saat beban penuh (V)	605	520	360	420	525
Arus saat beban penuh (A)	1150	3000	3000	3310	3700/5100
Batas tegangan tertinggi (V)	770	750	610	715	1000
Tipe eksitasi	DC	DC	AC	AC	AC
Kecepatan eksiter (rpm)	860	750	3000	3000	3000
Tipe penggerak eksiter	Tidak langsung	Tidak langsung	Langsung	Langsung	Langsung

<sup>2</sup> Ibid, hal. 39

### 3.4 TIPE SISTEM EKSITASI DAN PEMODELANNYA

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa dengan bertambahnya kapasitas dari generator maka daya eksitasi yang dibutuhkan juga bertambah. Oleh karena itu berkembanglah beberapa tipe dari sistem eksitasi yang dikelompokkan menjadi tiga tipe khusus<sup>3</sup>, yaitu :

1. Sistem eksitasi tipe DC.

Menggunakan generator DC dengan sebuah komutator sebagai sumber daya dari sistem eksitasi.

2. Sistem eksitasi tipe AC.

Menggunakan alternator dan rectifier yang tidak bergerak maupun rectifier berputar untuk menghasilkan arus DC yang dibutuhkan untuk medan generator.

3. Sistem eksitasi tipe statis.

Daya eksitasinya diperoleh melalui transformator dan rectifier.

#### 3.4.1 Sistem Eksitasi Tipe DC - Sistem dengan Eksiter Komutator DC Rotasi<sup>4</sup>

Pada saat ini eksiter tipe DC sedikit diproduksi, dan digantikan oleh sistem tipe AC dan Statis. Dengan berkurangnya persentase dan pentingnya unit yang dipakai, konsep perhitungan sebelumnya dikembangkan untuk efek pembebanan pada eksiter dengan menggunakan kurva saturasi terbeban.

---

<sup>3</sup> IEEE COMMITTEE REPORT, EXCITATION SYSTEM MODELS FOR POWER SYSTEM STABILITY STUDIES, IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981, pp. 494-509

<sup>4</sup> Ibid, hal. 495

### 3.4.1.1 Model Sistem Eksitasi Tipe DC 1

Model ini ditunjukkan oleh blok diagram pada gambar 3.5 yang dipakai untuk menyatakan kontrol medan pada eksiter komutator DC yang terus menerus berlaku sebagai regulator tegangan (khususnya rheostat langsung, amplifier rotasi dan tipe amplifier magnetik)

Contohnya :

Allis Chalmers - Regulex regulator

General Electric - Amplidyne regulator

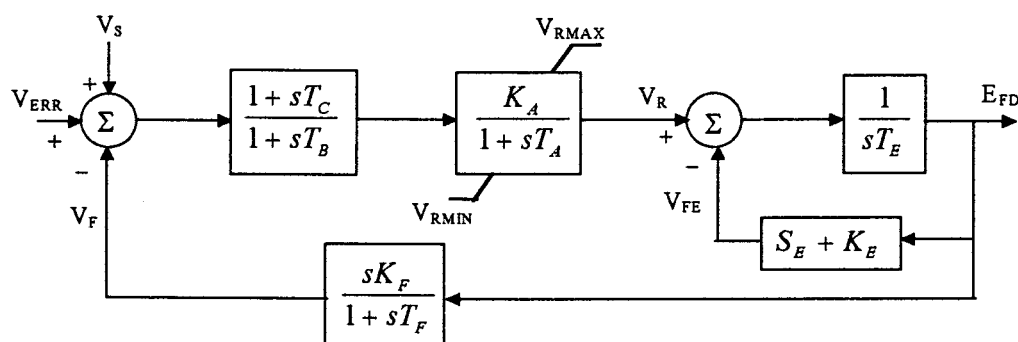
GDA regulator

Westinghouse - Mag-A-Start regulator

Rototrol regulator

Silverstat regulator

TRA regulator



Gambar 3.5 Tipe DC 1 - Eksiter komutator DC

Prinsip input pada model ini adalah sinyal error tegangan terminal  $V_{ERR}$  dari transducer tegangan terminal generator dan model kompensator beban .

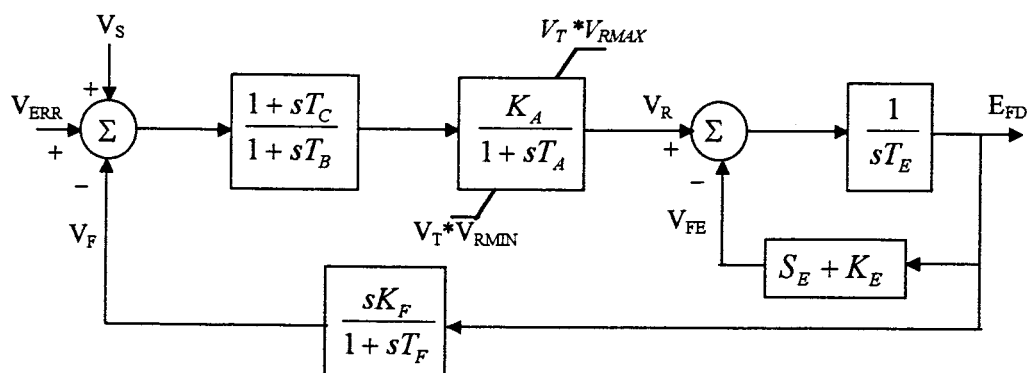
Stabilisasi umpan balik negatif  $V_F$  dan sistem daya  $V_S$  sebagai sinyal penstabil ditambahkan pada  $V_{ERR}$ . Pada keadaan steady-state kedua sinyal terakhir bernilai nol dan yang tersisa adalah sinyal error tegangan terminal. Sinyal yang dihasilkan kemudian diperkuat dengan regulator. Time constant utama  $T_A$ , dan gain  $K_A$ , berhubungan dengan pengatur tegangan pada saturasi khusus pada batas *non-windup* atau batas penguat power supply. Pengatur tegangan memakai sumber daya yang tidak dipengaruhi oleh transient singkat pada generator atau bus tambahan. Time constant  $T_B$  dan  $T_C$  dapat dipakai pada model ekivalen time constant yang sama pada pengatur tegangan. Tapi time constant ini seringkali diabaikan dan ketetapan harus dibuat pada input nol.

Output pengatur tegangan  $V_R$  dipakai untuk mengontrol eksiter yang mungkin terpisah atau mungkin berupa eksiter sendiri. Ketika medan shunt yang tereksitasi sendiri dipakai,  $K_E$  menyatakan setting rheostat medan shunt.

Kebanyakan eksiter ini memakai medan shunt tereksitasi sendiri dengan pengatur tegangan yang beroperasi pada mode yang biasanya disebut "*buck-boost*". Banyak operator stasiun secara manual mengatur regulator tegangan melalui perlengkapan rheostat set point secara periodik, sehingga diperoleh output pengatur tegangan nol. Hal ini dapat disimulasikan dengan pemilihan nilai  $K_E$ , sehingga initial condition dipenuhi dengan  $V_R$  bernilai nol.  $S_E$  menyatakan saturasi eksiter dan nilainya adalah fungsi tegangan output eksiter  $E_{FD}$ . Sinyal  $V_F$  diperoleh dari  $E_{FD}$ , yang biasanya dipakai untuk memberikan kestabilan eksitasi.

### 3.4.1.2 Model Sistem Eksitasi Tipe DC 2

Model yang ditunjukkan pada gambar 3.6, digunakan untuk kontrol medan eksiter komutator DC dengan pengatur tegangan secara terus-menerus yang diperoleh dari generator atau bus tegangan tambahan. Perbedaannya dengan tipe DC 1, hanya dalam batas output pengatur tegangan yang proporsional dengan  $V_T$ . Ini mewakili solid state, penggantian rectifier terkontrol untuk berbagai bentuk mesin lama dan peralatan amplifier rotasi.



Gambar 3.6 Tipe DC 2-Eksiter komutator DC

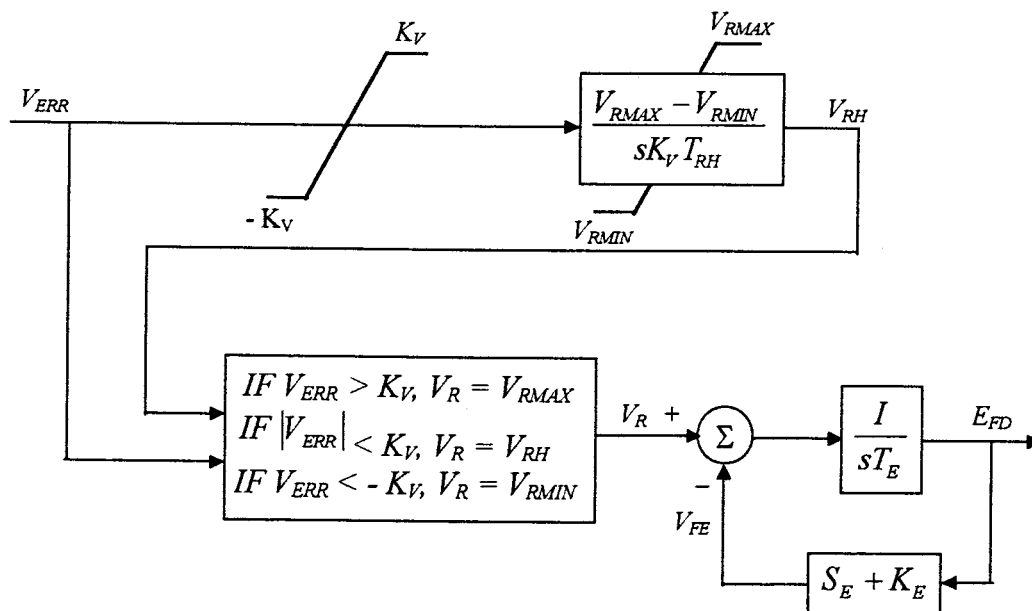
### 3.4.1.3 Model Sistem Eksitasi Tipe DC 3

Sistem yang sebelumnya dibicarakan, menggambarkan generasi pertama dari gain yang tinggi serta tindakan yang cepat dari eksitasi. Sistem tipe DC 3 digunakan untuk menggambarkan sistem yang lama, khususnya eksiter komutator DC dengan tanggapan regulator yang tidak kontinyu, yang biasa digunakan sebelum dikembangkan variasi tanggapan kontinyu.

Beberapa contoh dari sistem ini adalah :

General Electric - dengan regulator GFA4

Westinghouse - dengan regulator BJ30



**Gambar 3.7** Tipe DC 3-Tanggapan Regulator tak kontinyu

Tanggapan sistem ini, yaitu pada sifat dasar yang dimiliki oleh dua kapasitas yang berbeda, tergantung atas magnitudo dari error tegangan. Untuk error yang kecil, pengaturan dilakukan secara periodik terhadap sinyal untuk pengoperasian motor rheostat. Error yang lebih besar menyebabkan resistor cepat terhubung singkat (short) dan daya sinyal yang kuat dimasukkan ke eksiter.

### **3.3.2 Sistem Eksitasi Tipe AC - Rectifier Sistem Eksitasi yang Disuplai oleh Alternator<sup>5</sup>**

Sistem eksitasi ini menggunakan alternator AC dan juga menggunakan rectifier stasioner atau rotasi untuk menghasilkan arus DC yang dibutuhkan untuk medan generator. Efek pembebanan pada eksiter tertentu adalah penting dan penggunaan arus medan generator sebagai input untuk model ini, yang membuat efeknya dapat dinyatakan secara akurat. Pada model ini ada yang memberikan kuat medan negatif (Tipe AC 4), tapi kebanyakan tidak mensuplai arus medan negatif. Untuk studi yang meliputi arus medan negatif (yaitu operasi asinkron) memerlukan model yang lebih detail.

#### **3.4.2.1 Model Sistem Eksitasi Tipe AC 1**

Model yang ditunjukkan pada gambar 3.8, yang menggambarkan sistem eksitasi rectifier alternator kontrol medan merupakan tipe AC 1. Sistem eksitasi ini terdiri dari alternator eksiter utama dengan rectifier tidak terkontrol. Eksiternya tidak memakai eksitasi sendiri dan daya pengatur tegangannya diambil dari sumber yang tidak terpengaruh oleh eksternal transien. Karakteristik diode pada output eksiter menentukan batas bawah nol pada tegangan output eksiter. Model ini dapat dipakai untuk simulasi kinerja sistem eksitasi brushless Westinghouse.

Untuk studi stabilitas sistem tenaga yang besar, eksiter alternator ditunjukkan oleh model yang disederhanakan. Efek pendemagnetan dari arus beban

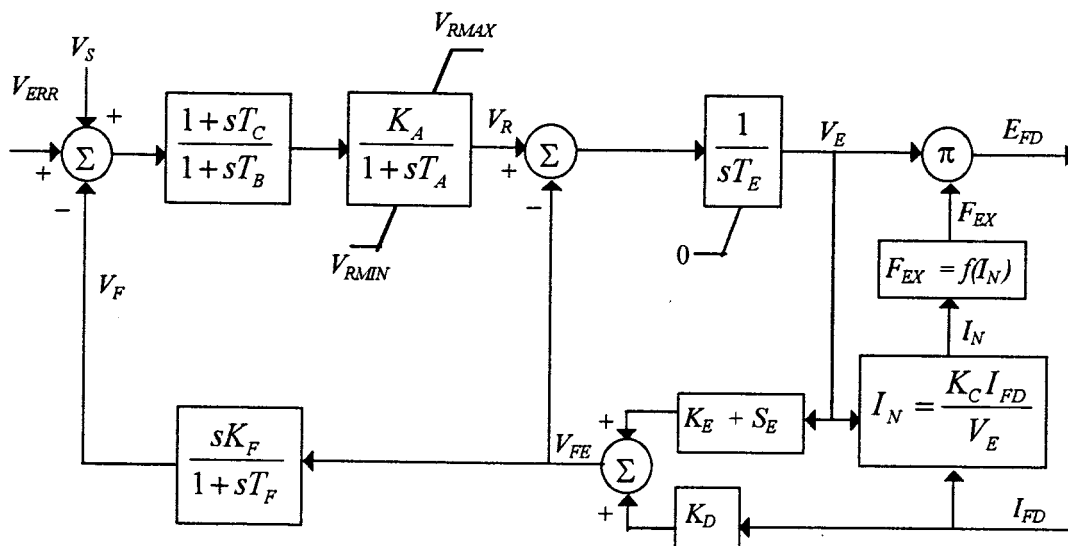
---

<sup>5</sup> Ibid, hal. 497.

( $I_{FD}$ ) pada output tegangan alternator eksiter dinamik ( $V_E$ ) diterangkan pada bagian feedback termasuk konstanta  $K_D$ . Konstanta ini merupakan fungsi dari eksiter alternator sinkron dan reaktansi transient.

Drop tegangan output eksiter yang berhubungan dengan regulasi rectifier disimulasikan dengan memasukkan konstanta  $K_C$  (yang merupakan fungsi reaktansi komutasi) dan pendekatan kurva rectifier regulasi  $F_{EX}$ .

Pada model, sinyal  $V_{FE}$  yang proporsional dengan arus medan eksiter didapat dari penjumlahan sinyal antara tegangan output eksiter  $V_E$  (dikalikan dengan bentuk  $K_E + S_E$ ) dan  $I_{FD}$  (dikalikan dengan bentuk pendemagnetan  $K_D$ ). Sinyal arus medan eksiter  $V_{FE}$  digunakan sebagai input untuk stabilizer sistem eksitasi pada model tipe AC 1.



**Gambar 3.8** Tipe AC 1 -Sistem Eksitasi Alternator-Rectifier dengan rectifier tidak dikontrol dan umpan balik dari arus medan eksitasi



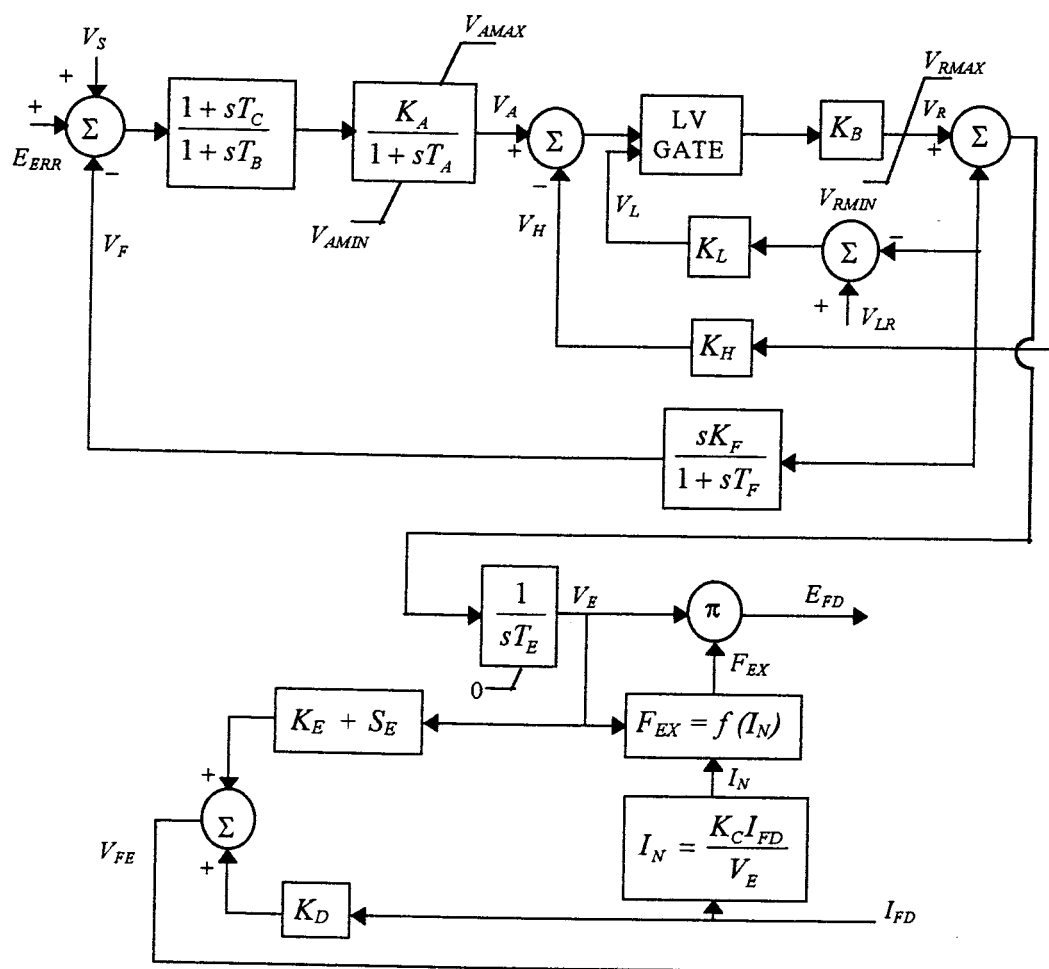
### 3.4.2.2 Model Sistem Eksitasi Tipe AC 2

Model yang ditunjukkan pada gambar 3.9, merupakan tipe AC 2 yang menggunakan respon medan awal yang tinggi pada kontrol sistem eksitasi alternator. Eksiter utama alternator menggunakan rectifier tak terkontrol. Model tipe AC 2 mirip dengan tipe AC 1, kecuali pada masukkan penambahan dua arus medan eksiter, simulasi lup umpan balik eksiter kompensasi time konstan dan arus medan eksiter batas elemen berturut-turut. Model ini dipakai untuk simulasi kinerja sistem eksitasi brushless Westinghouse dengan respon awal yang tinggi.

Time konstan kompensasi eksiter pada pokoknya terdiri dari umpan balik negatif langsung ( $V_H$ ) selama time konstan medan eksiter dengan penurunan nilai efektif, dengan demikian dapat menambah *bandwidth* dari sistem eksitasi dengan respon sinyal yang kecil. Time konstan dikurangi oleh gain  $(1 + K_B K_H)$  pada lup kompensasi dan secara normal lebih bagus dari permintaan magnitude yang rendah daripada time konstan tanpa kompensasi.

Untuk mendapatkan respon awal yang tinggi pada sistem ini, tegangan lawan yang tinggi ( $V_{RMAX}$ ) dipakai pada medan eksiter. Batas arus medan eksiter dipakai untuk memberikan tegangan lawan yang besar, tapi masih dalam batas arus. Dengan pendekatan arus medan eksiter, tegangan output eksiter ( $V_E$ ) dibatasi untuk nilai yang dipilih ( $V_{LR}$ ) yang biasanya dihitung dengan rasio respon sistem eksitasi yang khusus. Sinyal output dari pengatur tegangan ( $V_A$ ) dan elemen kompensasi time konstan ( $V_H$ ) dibandingkan dengan sinyal output ( $V_L$ ) dari pembatas pada kontrol rangkaian logika dimana fungsinya adalah menyediakan

transisi yang tepat dari kontrol regulator ke pembatas kontrol eksitasi pada nilai pendekatan.



**Gambar 3.9** Tipe AC 2 -Respon awal yang tinggi dari Sistem Eksitasi Alternator-Rectifier dengan Rectifier tak terkontrol dan umpan balik arus medan eksiter

### 3.4.2.3 Model Sistem Eksitasi Tipe AC 3

Model yang ditunjukkan pada gambar 3.10, menggambarkan rectifier sistem eksitasi alternator medan terkontrol adalah merupakan model eksitasi tipe

AC 3. Sistem eksitasi ini meliputi alternator eksiter utama dengan rectifier tak terkontrol. Eksiternya menggunakan eksitasi sendiri dan daya pengatur tegangan diperoleh dari tegangan output eksiter. Oleh karena itu, sistem ini memiliki tambahan ketidaklinearan yang disimulasikan dengan menggunakan pengali yang inputnya adalah sinyal yang dibangkitkan oleh pengatur tegangan,  $V_A$  dengan tegangan output eksiter,  $E_{FD}$  dan waktu  $K_R$ . Sistem ini dipakai pada beberapa sistem, seperti sistem eksitasi General Electric ALTERREX yang menggunakan pengatur tegangan statis.

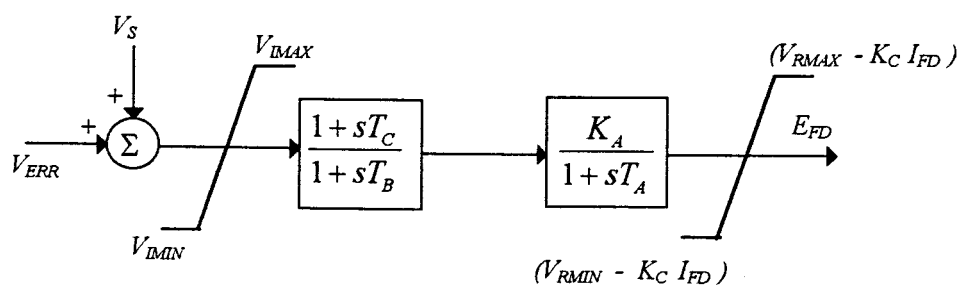
Untuk studi kestabilan sistem tenaga yang besar, maka eksiter alternator telah disederhanakan. Efek pendemagnetan arus beban ( $I_{FD}$ ) pada tegangan output eksiter alternator dinamik ( $V_E$ ) dapat diberi keterangan yang jelas. Bagian umpan balik, termasuk konstanta  $K_D$ , merupakan fungsi dari eksiter alternator sinkron dan reaktansi transient. Drop tegangan output eksiter yang disebabkan oleh regulasi tegangan disimulasikan dengan memasukkan konstanta  $K_C$  (yang merupakan fungsi reaktansi komutasi) dan pendekatan kurva regulasi  $F_{EX}$ .

Pada model, sinyal proporsional yang menuju ke arus medan eksiter diperoleh dari penjumlahan sinyal dari tegangan output eksiter  $V_E$  (dikalikan dengan bentuk  $K_E + S_E$ , dimana  $S_E$  menyatakan saturasi) dan  $I_{FD}$  (perkalian dengan faktor pendemagnetan  $K_D$ ).

Stabilizer sistem eksitasi juga memiliki karakteristik non linear. Gainnya adalah  $K_F$  dengan tegangan output eksiter yang lebih kecil dari  $E_{FDN}$ . Ketika output eksiter melebihi  $E_{FDN}$ , nilai gain ini menjadi  $K_N$ .



mengontrol tegangan outputnya menjadi nilai yang konstan. Efek ini tidak dimodelkan, walaupun efek pembebanan transient pada eksiter alternator dimasukkan. Pembebanan eksiter dibatasi dan efek pembebanannya dapat diterangkan dengan jelas, dengan menggunakan arus beban eksiter dan reaktansi komutasi untuk memodifikasi batas eksitasi. Stabilitas sistem eksitasi seringkali disempurnakan pada sistem thyristor dengan jaringan lag-lead seri yang lebih baik daripada melalui kecepatan umpan balik. Time konstan  $T_B$  dan  $T_C$  akan digunakan untuk simulasi fungsi kontrol ini. Secara keseluruhan gain ekuivalen dan time konstan yang dihubungkan dengan regulator dan atau *firing* dari thyristor akan disimulasikan dengan  $K_A$  dan  $T_A$  secara berturut-turut. Sistem yang menggunakan Model simulasi ini yaitu General Electric ALTHYREX dan sistem eksitasi Thyristor rotasi.



**Gambar 3.11** Tipe AC 4-Alternator yang dikontrol oleh rectifier eksiter

### 3.4.3 Sistem Eksitasi Tipe Statis<sup>6</sup>

Sistem eksitasi ini menggunakan transformator untuk mengubah tegangan (dan juga arus dalam sistem kompon) ke level yang tepat. Rectifier, baik yang terkontrol atau yang tidak terkontrol menyediakan arus searah yang penting untuk medan generator. Ketika banyak sistem ini memberikan tegangan medan lawan negatif, tapi sebagian besar tidak mensuplai arus medan negatif. Untuk studi yang menyangkut arus medan negatif (yaitu operasi asinkron) dibutuhkan pemodelan yang lebih detail.

Pada beberapa sistem statis, batas tertinggi tegangan eksiter sangat tinggi. Untuk beberapa sistem seperti penambahan rangkaian batas arus medan, yang dapat mengamankan eksiter dan rotor generator, tidak ditunjukkan pada model ini.

#### 3.4.3.1 Model Sistem Eksitasi Tipe ST 1

Model komputer dari sumber potensial yang dikontrol oleh rectifier eksiter pada sistem eksitasi tipe ST 1, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.12 dimaksudkan untuk menggambarkan semua sistem dimana daya eksitasi yang terus disuplai oleh transformator dari terminal generator (atau unit-unit pada bus pembantu) dan diatur dengan rectifier terkontrol. Tegangan eksiter maksimum didapatkan dari sistem tertentu yang secara langsung dihubungkan pada tegangan terminal generator.

---

<sup>6</sup> Ibid, hal. 499.

Pada tipe ini, time konstan eksiter bersifat sangat kecil dan stabilisasi eksiter tertentu secara normal tidak dibutuhkan. Dilain sisi, ini mungkin diperlukan sekali untuk mengurangi gain transient pada sistem tertentu untuk alasan yang lain. Model yang ditunjukkan cukup berguna untuk menggambarkan reduksi gain transient yang salah satu dilaksanakan pada bagian depan melalui time konstan  $T_B$  dan  $T_C$  (dimana  $K_F$  dapat diset normal menjadi nol), atau pada bagian umpan balik dengan pemilihan yang cocok dari parameter umpan balik  $K_F$  dan  $T_F$ . Gain pengatur tegangan dan beberapa sifat time konstan sistem eksitasi digambarkan dengan  $K_A$  dan  $T_A$ .

Pada beberapa pokok pembatas internal yang mengikuti cabang tambahan dapat diabaikan, tapi batas tegangan medan dimana fungsi dari kedua terminal tegangan (kecuali ketika eksiter disuplai dari bus bantu dan tidak disuplai dari terminal generator) dan arus medan generator harus dimodelkan. Mungkin digambarkan batas tegangan medan sebagai fungsi linear dari arus medan generator, karena operasi dari jembatan rectifier pada sistem tertentu. Sebagai tambahan, untuk sebagian besar transformator masukan sistem  $K_C$  sangat kecil, bentuk tersebut diabaikan untuk beberapa studi ketika sebagian besar sistem eksitasi tersebut menggunakan secara penuh jembatan terkontrol, modelnya dipakai dengan baik pada sistem semi kontrol, dimana batas tertinggi negatif diset 0 (nol).

Contoh sistem eksitasi tipe ST 1 :

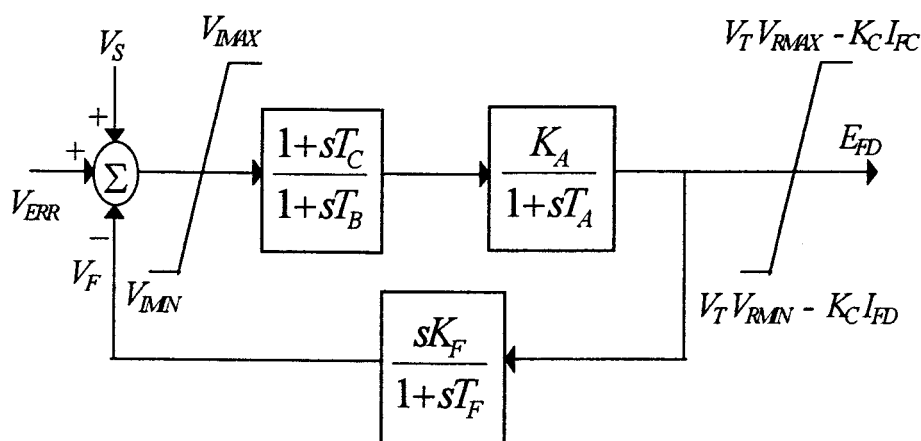
Canadian General Electric Silcomatic Exciters

Westinghouse Canada Solid State Thyristor Exciter

# Westinghouse Type PS Static Excitation Systems dengan tipe regulator

WTA atau WHS

Karakteristik kosinus menghubungkan sudut *firing* thyristor untuk output jembatan yang dikompensasi dengan fungsi inverse kosinus antara output regulator dan sudut *firing*. Pada sistem tertentu gain  $K_A$  adalah sebuah konstanta dan tidak tergantung pada tegangan suplai eksiter. Pada beberapa sistem, kompensasi inverse kosinus ini tidak dipakai dan bentuk  $K_A$  menjadi fungsi kosinus yang tergantung pada tegangan suplai.

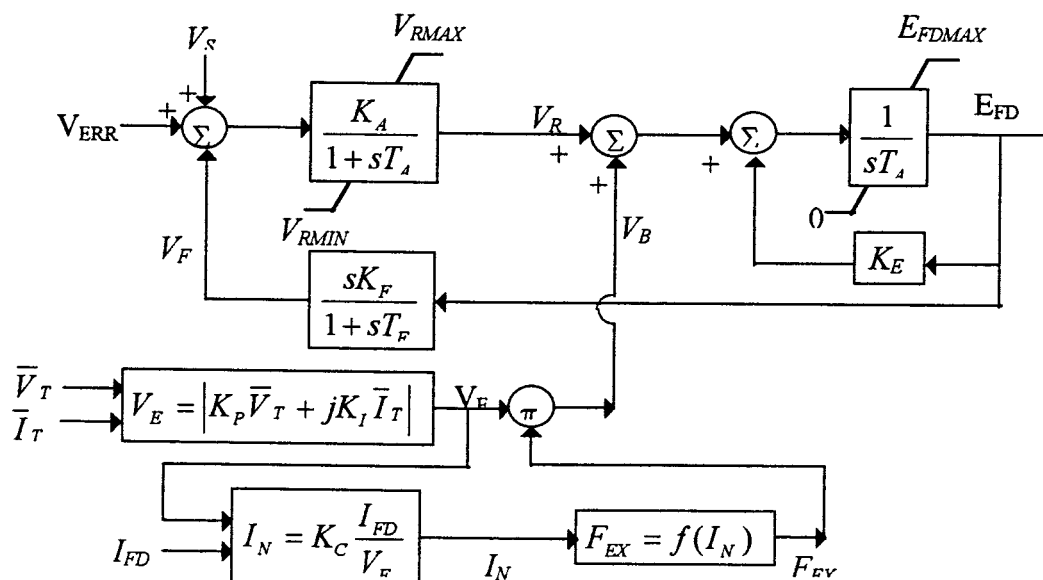


**Gambar 3.12** Tipe ST 1 - Sumber potensial yang dikontrol oleh rectifier Eksiter



### 3.4.3.2 Model Sistem Eksitasi Tipe ST 2

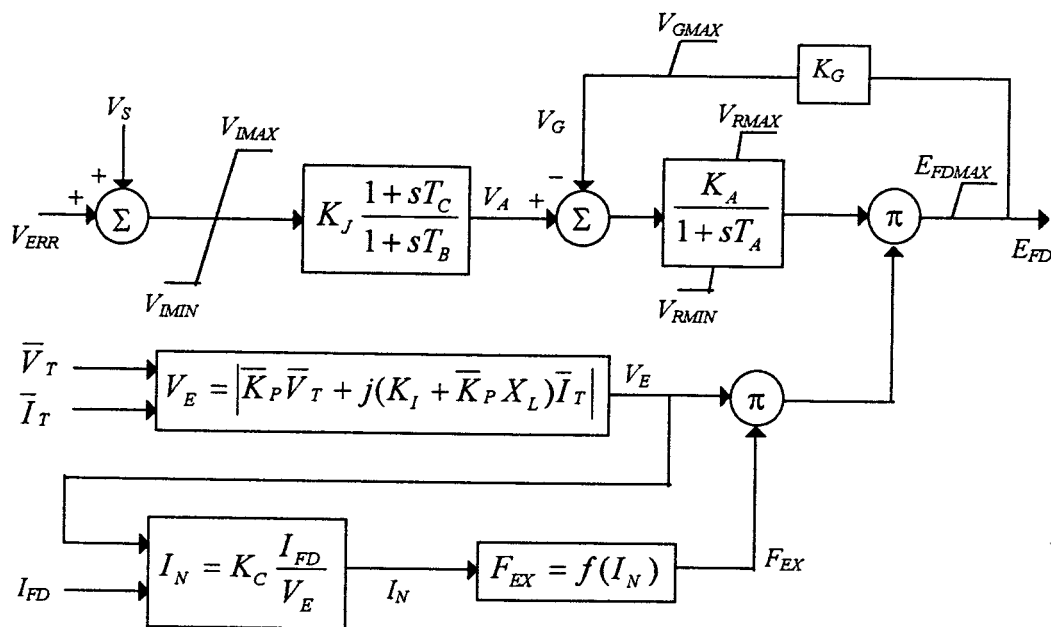
Beberapa sistem statis menggunakan sumber arus dan tegangan (kapasitas terminal generator). Sistem eksitasi rectifier eksiter sebagai sumber kompon ini adalah merupakan desain tipe ST 2, dan modelnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13. Ini penting untuk bentuk sumber daya eksiter dari kombinasi phasor dari tegangan terminal  $V_T$  dan terminal arus  $I_T$ .  $E_{FD}$  maksimum mewakili batas pada tegangan eksiter termasuk saturasi dari komponen magnetik. Output regulator mengontrol eksiter melalui pengontrolan saturation dari komponen trafo daya.  $T_E$  mewakili kecepatan integrasi yang digabungkan dengan induktansi dari kontrol belitan. Salah satu contoh sistemnya adalah sistem eksitasi statis General Electric, seperti SCT - PPT atau SCPT.



Gambar 3.13 Tipe ST 2-Rectifier Eksiter sebagai sumber kompon

### 3.4.3.3 Model Sistem Eksitasi Tipe ST 3

Beberapa sistem statis menggunakan kuantitas internal pada generator (yang dapat digunakan sebagai kombinasi phasor tegangan terminal generator dan arus) untuk sumber daya eksitasi. Sistem eksitasi sumber kompon yang dikontrol oleh rectifier eksiter yang menggunakan rectifier terkontrol pada rangkaian output eksiternya adalah merupakan tipe ST 3 dan digambarkan oleh model yang ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Tipe ST 3 -Sumber kompon yang dikontrol oleh rectifier Eksiter

Stabilizer sistem eksitasi pada sistem ini disediakan oleh elemen lag-lead seri, yang ditunjukkan oleh time konstan  $T_B$  dan  $T_C$ . Pada pusat lup pengatur tegangan medan yang terdiri dari gain  $K_A$  dan  $K_G$  serta time konstan  $T_A$ . Batas  $E_{FD}$

maksimum dibuktikan dengan level saturasi dari komponen daya. Sistem yang termasuk dalam tipe ini adalah General Electric GENERREX dan sistem eksitasi Shunt-Thyristor.

### **3.5 PENALAAN TERHADAP PARAMETER SISTEM EKSITASI UNTUK MEMBERIKAN KINERJA SISTEM YANG LEBIH BAIK**

Konstanta penguatan amplifier ( $K_A$ ), waktu tanggap amplifier ( $T_A$ ), waktu tanggap eksiter ( $T_E$ ), konstanta penguatan eksiter ( $K_E$ ) adalah merupakan parameter-parameter yang penting dalam sistem eksitasi. Bila terjadi gangguan, baik yang disebabkan karena adanya perubahan beban maupun yang disebabkan oleh adanya gangguan internal pada generator maka parameter-parameter pada sistem eksitasi tersebut akan menyebabkan sistem kehilangan kestabilan (sistem menjadi tidak stabil/berosilasi).

Untuk menghasilkan kembali sistem yang stabil (tidak berosilasi) maka perlu adanya penalaan kembali terhadap parameter-parameter sistem eksitasi. Penalaan ini dapat dilakukan dengan menggunakan filter lag-lead ataupun dapat menggunakan umpan balik kecepatan (rate feedback).

#### **3.5.1 Filter Lag-Lead Pada Sistem Eksitasi<sup>7</sup>**

Filter lag-lead merupakan penggabungan antara filter lag dengan filter lead. Filter lead akan mempertinggi kecepatan respon dan memperkecil besarnya

<sup>7</sup> RODOLFO J. KOESSLER, TECHNIQUES FOR TUNING EXCITATION SYSTEM PARAMETERS, IEEE TRANSACTION ON ENERGY CONVERSION, Vol. 3, No. 4, December 1988, hal. 787.

Ketika  $1/T_C$  lebih kecil dari frekuensi crossover, gain aktual yang diperlihatkan oleh loop pengatur tegangan yang merupakan gain transien mempunyai nilai  $K_a$  sebesar  $K_A T_B / T_C$ .

Jika  $T_A = 0,05$ ,  $T'_{do} = 5$ , dan gain transien maksimum  $= 5/(2 \cdot 0,05) = 50$ ,  $T_C$  dipilih sehingga  $1/T_C$  menjadi 10 kali lebih kecil dari frekuensi crossover. Hal ini disebabkan karena :

- [a]. Pemberian fasa lag pada filter lag lead harus kecil pada frekuensi crossover.
- [b]. Jika batas eksiter rendah (5 p.u atau lebih kecil), diharapkan menambah dari operasi non linear yang penting (batas pengukur eksiter), dimana hal ini sebaiknya dapat menambah  $T_C$  yang diberikan oleh [a]. Ini akan menghindari crossing over dalam daerah sudut fasa yang lebih tinggi ketika gain efektif dikurangi sesuai dengan operasi non linear.

Ketika menggunakan sistem eksitasi tipe lag-lead, dan simulasi respon step rangkaian terbuka akan memperlihatkan ketidakstabilan atau loop pengatur tegangan (voltage regulator) berosilasi, sehingga prosedur penalaan yang disarankan adalah sebagai berikut :

- [a]. Bandingkan  $T_A$  dan  $T'_{do}$  dengan data tipikal ( $T_A$  tergantung pada karakteristik eksiter dan  $T'_{do}$  umumnya pada level 5 - 10 second). Jika  $T_A$  dan  $T'_{do}$  sama, maka  $T_A$  dan  $T'_{do}$  dianggap masih akurat dan tidak dapat ditala, karena waktu ini berhubungan dengan ukuran peralatan dan karakteristiknya tidak mudah dimodifikasi.

Karena kebutuhan akan pengaturan tegangan  $K_A$  harus 200 atau lebih, meskipun gain steady state mudah dimodifikasi dalam sistem eksitasi modern, tetapan ini bukanlah faktor yang tepat untuk kinerja dinamis. Sehingga jika sesuai tetapan ini dapat dianggap akurat dan tidak dapat ditala.

Sebaliknya  $T_B$  dan  $T_C$  adalah merupakan parameter penalaan khusus, dan dapat diasumsikan bahwa bidang teknik (engineer) dapat memodifikasinya untuk menstabilkan loop pengatur tegangan.

- [b]. Gain transien maksimum ditentukan dengan persamaan :

$$K_a < \frac{T_{d0}}{2T_A} \quad (3.2)$$

- [c]. Menentukan pengurangan gain transien (Transient Gain Reduction) yang penting, yaitu :

$$T.G.R = \frac{K_a}{K_A} \quad (3.3)$$

- [d]. Menentukan frekuensi crossover yang diinginkan :

$$\omega_c = \frac{1}{2T_A} \quad (3.4)$$

- [e]. Memilih  $1/T_C$  3 sampai 6 kali lebih kecil dari  $\omega_c$  , tergantung dari operasi non linear yang diharapkan :

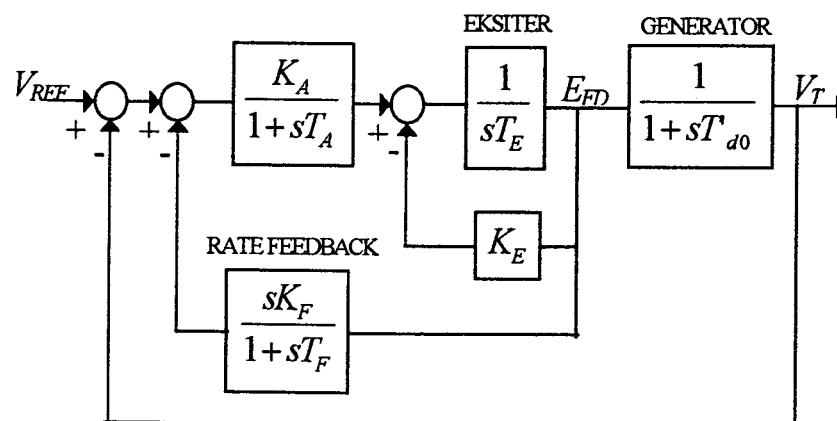
$$T_C = \frac{3..6}{\omega_c} \quad (3.5)$$

- [f]. Berdasarkan pada keperluan pengurangan gain transient yang dihitung dalam [c] sehingga diperoleh  $T_B$  :

$$T_B = \frac{T_C}{T.G.R} \quad (3.6)$$

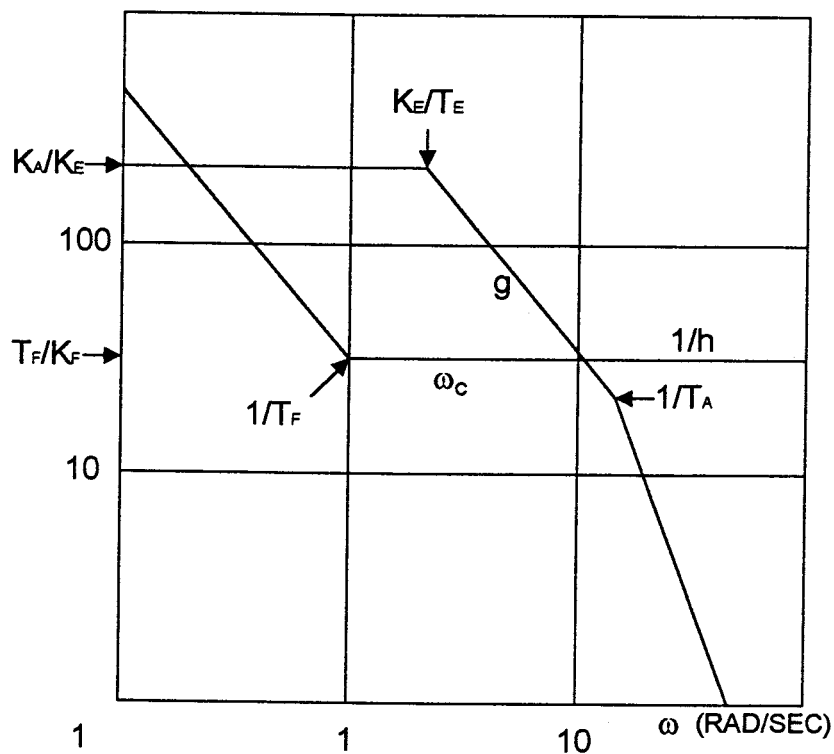
### 3.5.2 Umpan Balik Kecepatan (Rate Feedback) Pada Sistem Eksitasi<sup>8</sup>

Pada model-model sistem eksitasi umpan balik kecepatan ditunjukkan oleh parameter  $K_F$  dan  $T_F$ , seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.17. Ketidaklinearan diabaikan, sedangkan  $T_C$  dan  $T_B$  diasumsikan sama sehingga dapat saling meniadakan. Sedangkan gambar 3.17 menunjukkan diagram Bode respon AVR dan respon frekuensi eksiter untuk sistem eksitasi penalaan yang baik. Diagram tersebut merupakan invers dari bagian umpan balik internal  $1/h$ , yaitu  $(1 + sT_F)/(sK_F)$  dan bagian internal maju  $g$ , yaitu  $K_A/(K_E(1 + sT_E/K_E)(1 + sT_A))$ .



**Gambar 3.17** Umpan balik kecepatan (Rate-feedback) pada model sistem eksitasi

<sup>8</sup> Ibid, hal. 787.



**Gambar 3.18** Bode diagram dari umpan balik kecepatan (Rate-feedback) pada model sistem eksitasi penalaan yang bagus (well-tuned)

Respon loop tertutup dari kontrol loop  $g - h$  adalah :

$$\text{C.L.R.} = \frac{g}{(1 + gh)}$$

Jika  $g \ll 1/h$ , dan  $gh \ll 1$ , sehingga C.L.R mendekati  $g$ .

Jika  $1/h \ll g$ , dan  $gh \gg 1$ , sehingga C.L.R mendekati  $1/h$

Sehingga respon loop tertutup dapat didekati dengan plotting  $g$  dan  $1/h$  dan memilih respon terendah dari kedua gain respon pada setiap frekuensi, sebagai respon loop tertutup pada frekuensi tersebut. Berpedoman pada gambar 3.18,

semua loop pengatur tegangan (AVR) akan memperlihatkan loop internal ini sebagai sistem yang ekuivalen dengan respon frekuensi yang digambarkan pada  $g$ . Dari 0 (nol) melalui perpotongan pertama  $g$  dan  $1/h$ , selanjutnya yang digambarkan oleh  $1/h$  melalui perpotongan ke dua antara  $g$  dan  $1/h$ , dan juga digambarkan oleh  $g$  untuk frekuensi yang lebih besar dari perpotongan ke dua.

Ketika respon yang ekuivalen ini dibandingkan dengan filter lag-lead, yaitu pengurangan gain transient. Penalaan pada tipe eksiter ini tidak hanya harus memperhatikan stabilitas loop regulasi tegangan tetapi juga stabilitas loop internal. Loop regulasi tegangan akan stabil selama crossover loop ini terjadi kira-kira pertengahan antara  $1/T_F$  dan perpotongan frekuensi yang ke dua. Pada pertengahan antara frekuensi tersebut fasa lag akan di kontribusikan dengan eksiter AVR yang kecil. Kontribusi utama fasa lag pada crossover adalah  $90^\circ$  yang sesuai dengan medan generator.

Time konstan loop internal akan stabil selama fasa margin  $gh$  pada crossover loop internal cukup tinggi. Selama crossover loop internal terjadi, yaitu ketika magnitude  $gh$  sama dengan 1, titik perpotongan diantara  $g$  dan  $1/h$  pada gambar 3.18 adalah nilai crossover loop internal. Loop internal selanjutnya akan cukup diredam sepanjang perpotongan ke dua yang terjadi pada frekuensi  $1/T_A$  atau dibawahnya. Ketika simulasi open sirkuit menunjukkan sifat osilasi atau tidak stabil prosedur penalaan yang diharapkan adalah sebagai berikut :

- [a]. Bandingkan  $K_A$ ,  $T_A$ ,  $T_E$ , dan  $T'_{d0}$  dengan data typical ( $K_A/K_E$  akan lebih tinggi dari 200, dengan  $K_E$  mendekati 0 atau 1,  $T_A$  dan  $T_E$  tergantung pada



karakteristik AVR dan eksiter dan  $T'_{d0}$  sekitar 5 - 10 second). Jika parameter-parameter tersebut memiliki nilai yang sesuai dengan yang ditetapkan tersebut, dapat diasumsikan bahwa nilai tersebut akurat dan tidak perlu ditala. Penalaan parameter yang khusus adalah  $T_F$  dan terutama sekali  $K_F$ .

- [b]. Seperti pada perkiraan awal, asumsikan bahwa crossover loop internal sebenarnya terjadi pada  $1/T_F$ . Maksudnya adalah :

$$\log (K_A/K_E) - \log (T_F/K_F) = \log (1/T_A) - \log (K_E/T_E) \quad (3.7)$$

$$\frac{K_A K_F}{K_E T_F} = \frac{T_E}{T_A K_E}$$

Kemudian persamaan tersebut menjadi :

$$K_A = \frac{T_F T_E}{T_A K_F} \quad (3.8)$$

- [c]. Dari asumsi [b], tetapkan kawasan yang memadai untuk crossover loop eksternal :

$$\log (1/T_A) - \log (1/T_F) = \log (5) \quad (3.9)$$

$$T_F/T_A = 5$$

$$T_F = 5T_A$$

- [d]. Dalam kawasan ini, crossover dari loop eksternal harus terjadi . Nilai eksak logaritme pertengahan antara  $1/T_A$  dan  $1/T_F$  dihitung dengan :

$$\log (1/T_F) + \frac{\log(1/T_A) - \log(1/T_F)}{2} = \log (\omega_c) \quad (3.10)$$

$$\omega_c = \frac{1}{T_A \sqrt{\frac{T_F}{T_A}}} = \frac{1}{T_A \sqrt{5}} = \frac{1}{2,236 T_A}$$

Crossover loop eksternal akan terjadi pada frekuensi ini selama :

$$\log (T_F/K_F) - \log (1) = \log (\omega_c) - \log (1/T'_{d0}) \quad (3.11)$$

$$T_F/K_F = \omega_c T'_{d0}$$

Akhirnya diperoleh :

$$T_F/K_F = 5T_A/K_F = T'_{d0}/T_A\sqrt{5} \quad (3.12)$$

$$K_F = \frac{5\sqrt{5}T_A^2}{T'_{d0}} = \frac{11,18T_A^2}{T'_{d0}}$$

[e]. Nilai aktual dari  $K_A$  , kemudian dibandingkan dengan asumsi dalam [b].

[e1]. Jika  $K_A$  mendekati  $(T_F T_E)/(K_F T_A)$ , dengan  $T_F$  dan  $K_F$  dihitung dalam [c]

dan [d], kemudian gunakan nilai  $T_F$  dan  $K_F$  sebagai penalaan parameter atau beberapa kombinasi dari  $T_F$  dan  $K_F$  selama rasio  $T_F/K_F$  sama dan selama  $T_F$  lebih besar dari nilai yang dihitung dalam [c] (hal ini penting ketika  $T_F$  adalah parameter yang tidak mungkin ditala).

[e2]. Jika  $K_A$  jauh lebih besar dari  $(T_F T_E)/(K_F T_A)$ , coba nilai yang dianjurkan dalam [e1]. Jika step respon masih berosilasi juga, satu-satunya alternatif adalah mengecek apakah  $K_A$  dapat disetel, dan juga atur menjadi  $(T_F T_E)/(K_F T_A)$  dan gunakan nilai  $K_F$  dan  $T_F$  yang dianjurkan dalam [e1].

[e3]. Jika  $K_A$  lebih rendah dari  $0,7(T_F T_E)/(K_F T_A)$ , perpotongan  $g$  dan  $1/h$  yang ke dua akan terjadi pada nilai lebih rendah dari  $1/T_A$ .

Perpotongan ke dua ini dapat dipilih pada frekuensi :

$$\omega_{2nd} = \sqrt{\frac{2,236K_A}{T'_{d0} T_E}} \quad (3.13)$$

Dari nilai  $T_F$  dan  $K_F$  yang baru dapat dihitung :

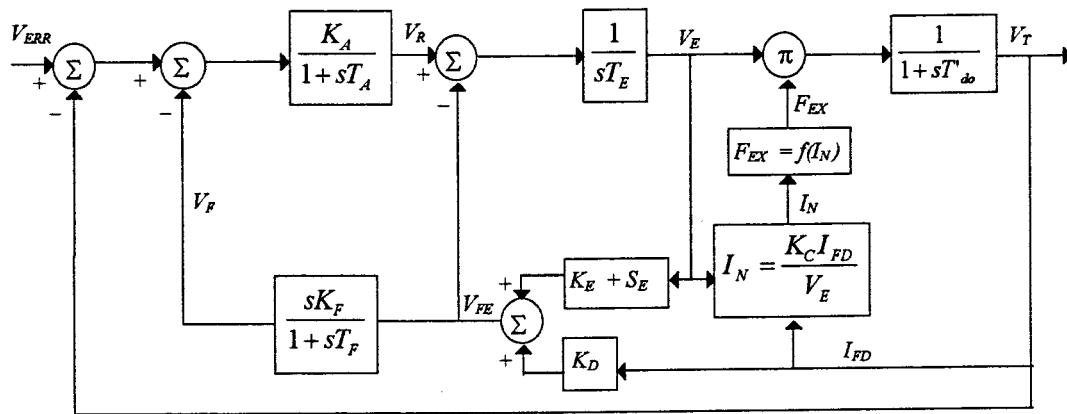
$$T_F = \frac{5}{\omega_{2nd}}, \text{ dan } K_F = \frac{11,18}{T_{d0} \omega_{2nd}^2} \quad (3.14)$$

Seperti pada [e1], nilai  $T_F$  dan  $K_F$  ini kemudian dapat digunakan untuk penalaan parameter, atau berbagai kombinasi dari  $T_F$  dan  $K_F$ , selama rasio  $T_F/K_F$  tetap sama, dan selama penggunaan  $T_F$  lebih besar dari satu perhitungan.

### 3.6 REDUKSI MODEL SISTEM EKSITASI MENJADI TIPE LAG-LEAD ATAU RATE FEEDBACK

Semua model eksiter yang telah digambarkan dalam sub bab 3.4 (kecuali model tipe DC 3 non linear) dapat direduksi atau disederhanakan menjadi salah satu dari dua tipe yang sebelumnya digambarkan, yaitu menjadi tipe lag-lead atau umpan balik kecepatan. Selanjutnya penalaan terhadap parameter-parameter eksiter tersebut menggunakan perhitungan pada salah satu tipe tersebut (tergantung hasil reduksi atau reduksi yang diinginkan).

Dari model-model sistem eksitasi, tipe AC memiliki model yang paling rumit diantara model-model yang ada. Selanjutnya akan diberikan contoh salah satu model sistem eksitasi yang akan direduksi menjadi tipe umpan balik kecepatan yaitu model sistem eksitasi tipe AC 1. Dalam hal ini ketidaklinearan diabaikan atau ditiadakan,  $T_C$  diasumsikan sama dengan  $T_B$  dan generator diwakilkan dengan  $1/(1+sT'_{d0})$ . Modelnya dapat dilihat pada gambar 3.19.



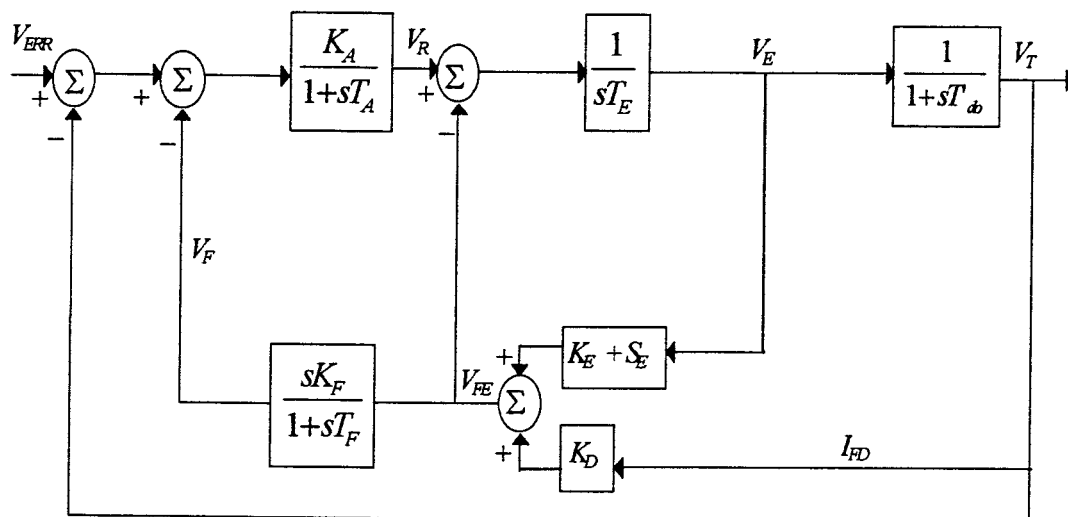
**Gambar 3.19** IEEE sistem eksitasi model AC 1 ( $V_T = I_{FD}$ )

Pada gambar 3.19 masih terdapat ketidaklinearan, yaitu hasil dari  $V_E F_{EX}$ .

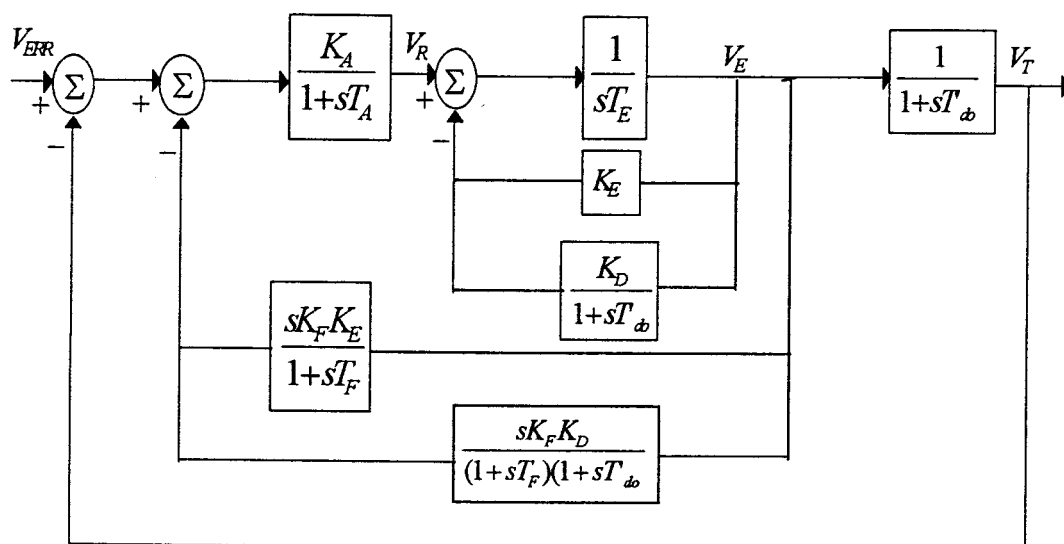
Turunan dari perkalian dari kuantitas (A dan B) dirumuskan sebagai :

$$d(AB) = A_0 \text{ dB} + B_0 \text{ dA}$$

Selanjutnya gambar 3.20 menunjukkan model AC 1 yang memakai  $F_{EX} = 1$  (satu) yang merupakan nilai maksimum dan nilai paling kritis dari  $F_{EX}$ . Sedangkan gambar 3.21, menunjukkan hasil dari reduksi dari model gambar 3.20 yang disederhanakan menjadi tipe umpan balik kecepatan (pada saat kondisi rangkaian terbuka, tanpa saturasi generator,  $I_{FD}$  dalam pu yang sama dengan tegangan terminal. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa model eksitasi AC 1 tidak menggunakan eksitasi sendiri, sehingga  $K_E = 1$ .



**Gambar 3.20** Reduksi pertama dari model AC 1 menjadi tipe rate feedback  
( $V_T = I_{FD}$ )



**Gambar 3.21** Reduksi kedua dari model AC 1 menjadi tipe rate feedback  
( $V_T = I_{FD}$ )

## BAB IV

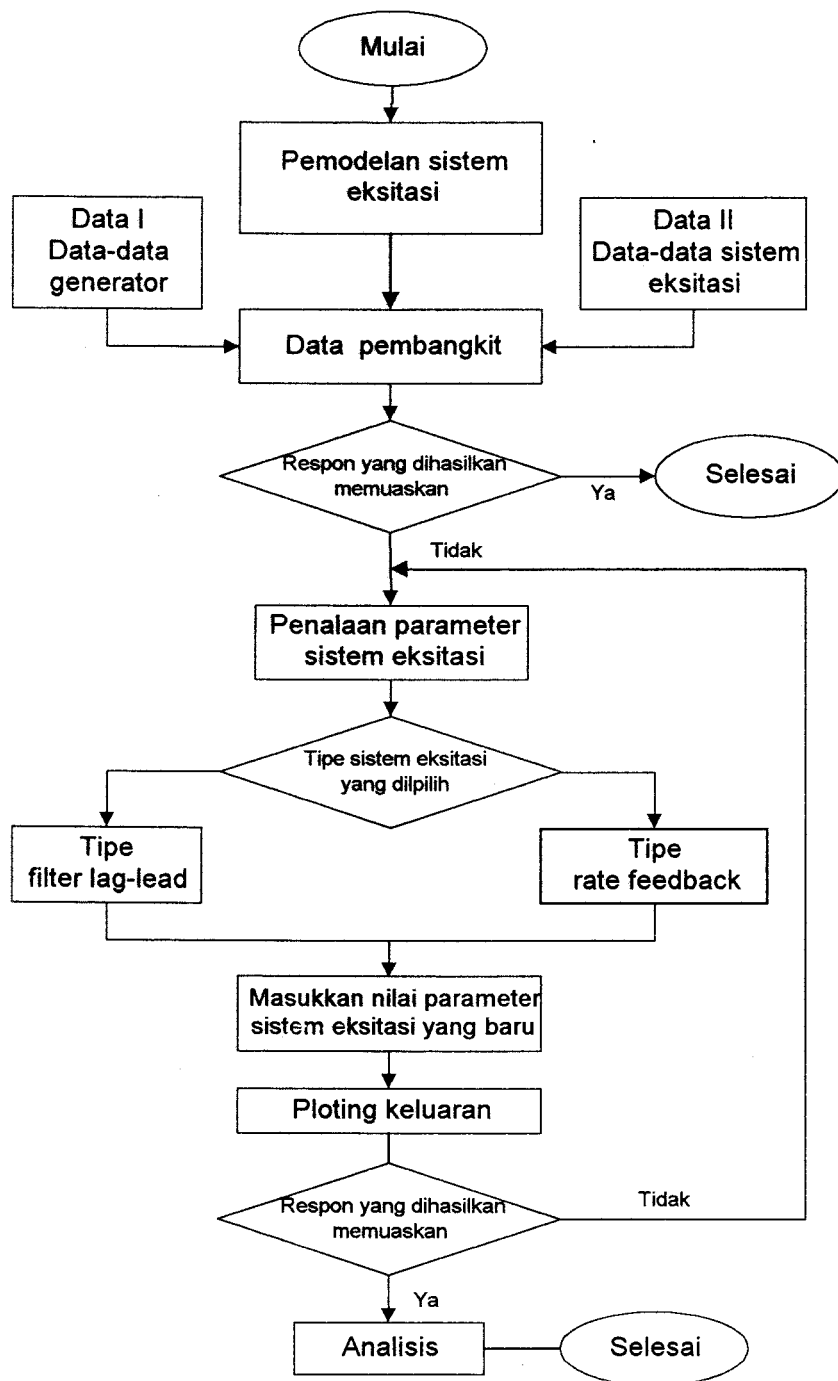
### ALGORITMA PERHITUNGAN

---

#### 4.1 ALGORITMA

Penalaan parameter sistem eksitasi dengan teknik respon frekuensi dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu :

- ➊ Tahap pertama adalah membentuk diagram blok dari sebuah unit pembangkit yang terdiri dari blok generator dan blok sistem eksitasi. Pada blok diagram tersebut blok generator dimodelkan dengan sebuah time konstan  $T'do$ , sedangkan blok sistem eksitasi terdiri dari blok AVR serta blok eksiter.
- ➋ Tahap kedua adalah mereduksi model sistem eksitasi yang digunakan menjadi salah satu dari dua tipe sistem eksitasi yang telah ditetapkan sebelumnya.
- ➌ Tahap ketiga adalah mencari data parameter sistem eksitasi dan data parameter generator.
- ➍ Tahap keempat adalah melakukan simulasi terhadap blok diagram tersebut. Bila output yang dihasilkan tidak stabil atau berosilasi, selanjutnya dilakukan penalaan terhadap parameter-parameter sistem eksitasi yang penting dengan menggunakan rumusan-rumusan pada salah satu tipe sistem eksitasi (tipe lag-lead atau rate feedback) setelah diturunkan dari diagram Bode. Rumus yang dipakai tergantung dari hasil reduksi.



Gambar 4.1 Flow chart

## 4.2 DATA

Data ini merupakan harga-harga parameter generator dan sistem eksitasi yang diambil dari referensi IEEE<sup>1</sup>. Data tersebut merupakan data step respon rangkaian terbuka untuk sistem yang terganggu.

**Tabel 4.1** *Data parameter generator*

DATA PARAMETER GENERATOR	
$T'_{do}$	5.00
$T''_{do}$	0.05
$T'_{qo}$	1.00
$T''_{qo}$	0.050
H	3.50
DAMP	0.00
$X_d$	1.8000
$X_q$	1.2780
$X'_d$	0.2700
$X'_q$	0.4500
$X''_d$	0.1980
$X_L$	0.0900
S(1.0)	0.1000
S(1.2)	0.5000

---

<sup>1</sup> RODOLFO J. KOESSLER, TECHNIQUES FOR TUNING EXCITATION SYSTEM PARAMETERS, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, Vol. 3, No. 4, December 1988, hal 790



**Tabel 4.2** *Data parameter sistem eksitasi*

DATA SISTEM EKSITASI	
$T_R$	0.00
$K_A$	120.0
$T_A$	0.15
$V_{RMAX}$	1.20
$V_{RMIN}$	- 1.20
$K_E$	1.00
$T_E$	0.50
$K_F$	0.02
$T_F$	1.00
$K_P$	1.19
$K_D$	0.38
$K_I$	2.50
$K_C$	0.50
$E_{FDMAX}$	4.50
$K_I \text{ VAR}$	0.00

### 4.3 HASIL SIMULASI DAN PERHITUNGAN

Simulasi disini akan diselesaikan dengan menggunakan bantuan komputer dan menggunakan MAT-LAB WITH SIMULINK for window. Hasil-hasil yang ditunjukkan oleh simulasi selanjutnya dianalisa. Bila hasil yang ditunjukkan tidak memuaskan atau tidak stabil, kemudian bandingkan parameter-parameter sistem eksitasi ( $K_A$ ,  $T_A$ ,  $T_E$  dan  $T'_{do}$ ) dengan data typical ( $K_A / K_E$  harus lebih besar dari 200, dengan  $K_E$  mendekati nol (0) atau satu (1),  $T_A$  dan  $T_E$  tergantung pada

AVR dan Eksiter dan  $T'_{do}$  harus berada antara 5 sampai 10 detik)<sup>2</sup>, apakah parameter-parameter sistem eksitasi tersebut dapat ditala atau tidak. Bila keduanya cocok, maka nilai-nilai parameter sistem eksitasi tersebut diasumsikan masih akurat dan tidak perlu ditala.

#### **4.3.1 Pemilihan Model Sistem Eksitasi**

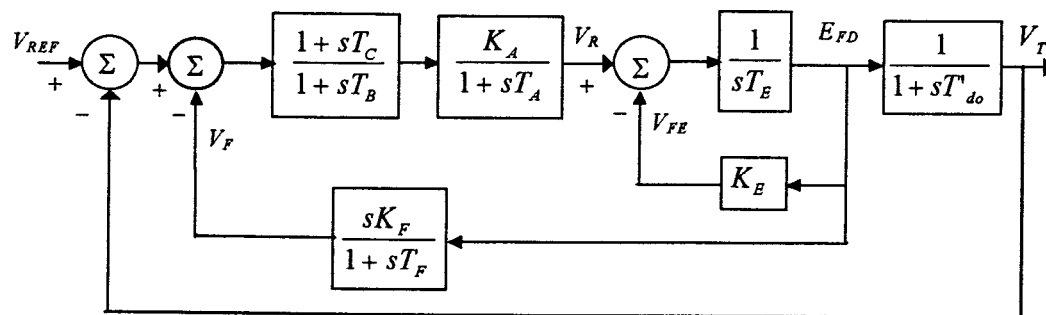
Untuk analisis akan dipilih dua model sistem eksitasi yang berbeda yaitu model sistem eksitasi tipe DC 1 dan model sistem eksitasi tipe AC 1. Kedua model yang dipilih tersebut akan diselesaikan dengan tipe sistem eksitasi yang berbeda (tipe filter lag-lead dan tipe umpan balik kecepatan). Model sistem eksitasi tipe DC 1 akan ditala dengan menggunakan tipe filter lag-lead, sedangkan model sistem eksitasi tipe AC 1 menggunakan tipe umpan balik kecepatan. Tapi sebelumnya, model yang digunakan pertama kali harus direduksi menurut tipe yang akan digunakan untuk menala parameter sistem eksitasi tersebut. Model yang dipilih dapat dilihat pada gambar 4.2 dan gambar 4.3.

#### **4.3.2 Simulasi dan Penalaan Parameter Sistem Eksitasi Tipe DC 1 dengan Tipe Filter Lag-Lead**

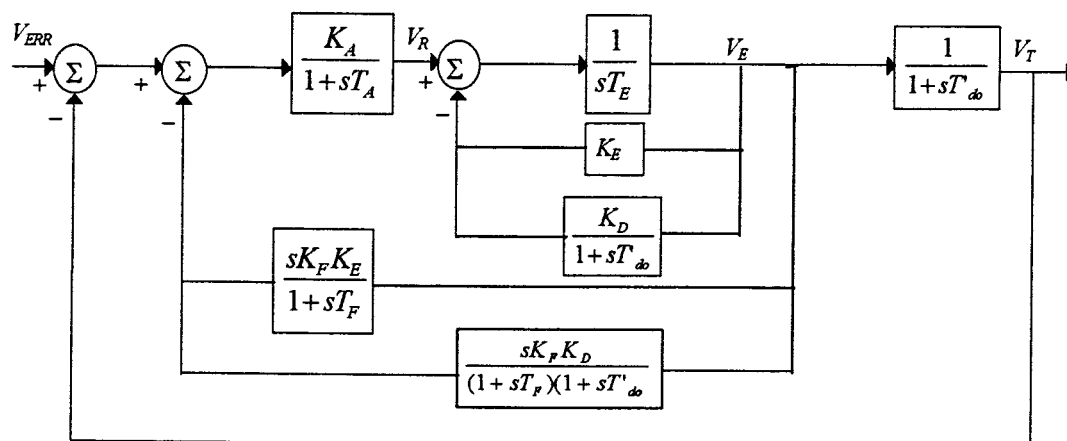
Simulasi pertama kali dilakukan dengan memasukkan data-data parameter generator (tabel 4.1) dan parameter sistem eksitasi (tabel 4.2) ke dalam blok diagram yang digambar pada MAT-LAB WITH SIMULINK.

---

<sup>2</sup> ibid, hal 788



**Gambar 4.2** Model DC 1 dengan filter lag-lead



**Gambar 4.3** Model AC 1 setelah direduksi menjadi tipe umpan balik kecepatan

Bila hasil simulasi menunjukkan ketidakstabilan atau lup pengatur tegangan beresilasi (lihat gambar 4.4), maka prosedur penalaannya adalah :

[1]. Menentukan parameter filter lag-lead  $T_B$  dan  $T_C$  dengan menggunakan persamaan pada sub bab 3.4.1, yaitu :

a. Gain transien maksimum ditentukan dengan persamaan :

$$K_a < \frac{T_{d0}}{2T_A}$$

$$K_a = \frac{5}{2 \times 0.15} = 16.6667$$

- b. Menentukan pengurangan gain transient (Transient Gain Reduction) yang penting, yaitu :

$$T.G.R = \frac{K_a}{K_A}$$

$$T.G.R = \frac{16.6667}{120} = 0.1389$$

- c. Menentukan frekuensi crossover yang di inginkan :

$$\omega_c = \frac{1}{2T_A}$$

$$\omega_c = \frac{1}{2 \times 0.15} = 3.3333$$

- d. Memilih  $1/T_C$  3 sampai 6 kali lebih kecil dari  $\omega_c$  , tergantung dari operasi non linear yang diharapkan :

$$T_C = \frac{3.6}{\omega_c}$$

$$T_C = \frac{6}{3.3333} = 1.8000$$

- e. Berdasarkan pada keperluan pengurangan gain transient yang dihitung dalam (b) sehingga diperoleh  $T_B$  :

$$T_B = \frac{T_C}{T.G.R}$$

$$T_B = \frac{1.8000}{0.1389} = 12.9591$$

- [2]. Dengan memasukkan nilai  $T_B$  dan  $T_C$  yang baru ke dalam blok diagram, setelah disimulasikan, diperoleh hasil seperti terlihat pada gambar 4.5.

#### 4.3.3 Simulasi dan Penalaan Parameter Sistem Eksitasi Tipe AC 1 dengan Tipe Umpan Balik Kecepatan

Seperti pada prosedur penalaan diatas, simulasi pertama kali dilakukan dengan memasukkan data-data parameter generator (tabel 4.1) dan parameter sistem eksitasi (tabel 4.2) ke dalam blok diagram yang digambar pada MAT-LAB WITH SIMULINK.

Bila hasil simulasi menunjukkan ketidakstabilan atau loop pengatur tegangan berosilasi (lihat gambar 4.6), maka prosedur penalaannya adalah :

- [1]. Menentukan nilai parameter  $K_A$ ,  $T_F$  dan  $K_F$  dengan menggunakan persamaan pada sub bab 3.4.2 , yaitu :

- a. Penalaan parameter stabilisasi dengan persamaan :

$$T_F = 5T_A$$

$$T_F = 5 \times 0.15 = 0.75$$

$$K_F = \frac{5\sqrt{5}T_A^2}{T_{d0}} = \frac{11.18T_A^2}{T_{d0}}$$

$$K_F = \frac{11.18 \times 0.15 \times 0.15}{5} = 0.0503$$

- b. Penalaan parameter pengatur tegangan  $K_A$  dengan menggunakan nilai parameter  $T_F$  dan  $K_F$  yang baru, yaitu :

$$K_A = \frac{T_F T_E}{T_A K_F}$$

$$K_A = \frac{(0.75 \times 0.5)}{(0.0503 \times 0.15)} = \frac{0.375}{0.007545} = 49.7018$$

- [2]. Dengan nilai  $K_F$ ,  $T_F$  dan  $K_A$  yang baru ke dalam blok diagram, setelah disimulasikan, diperoleh hasil seperti terlihat pada gambar 4.7.

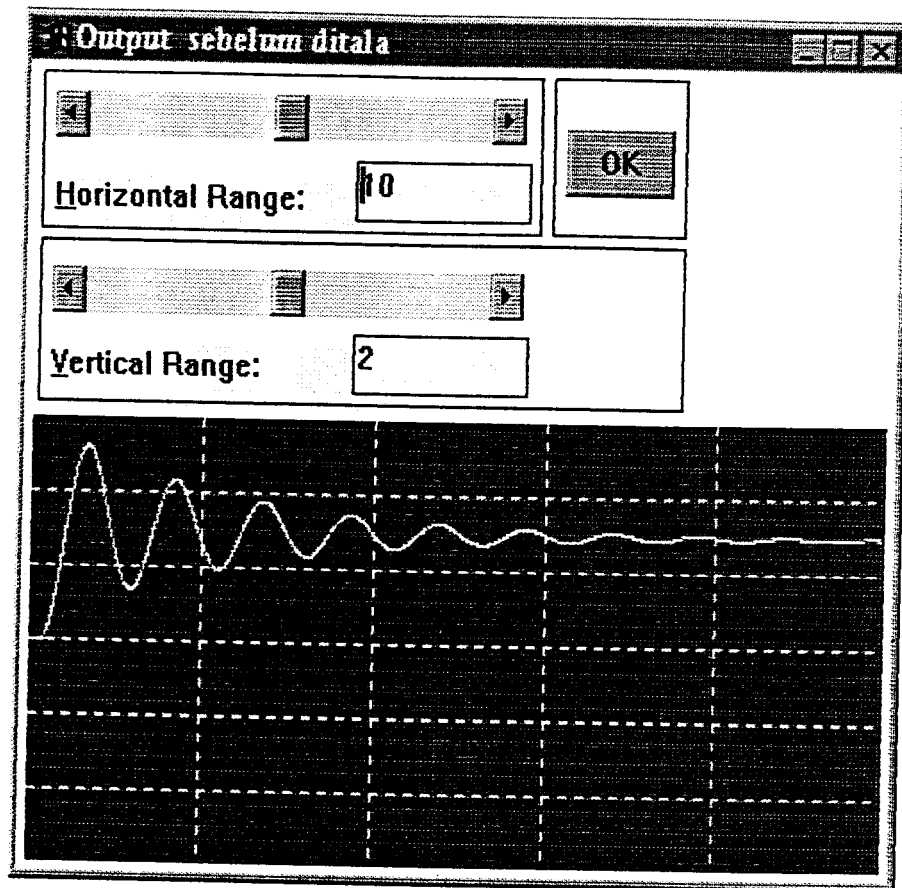
#### 4.4 ANALISIS

Dari hasil simulasi (grafik) yang dihasilkan yaitu antara sistem sebelum penalaan dengan sistem setelah penalaan terhadap parameter sistem eksitasi maka dapat diketahui respon waktu peredaman menuju keadaan mantap terhadap perubahan beban. Respon waktu yang dihasilkan dapat dilihat pada tabel 4.3.

**Tabel 4.3** *Respon waktu tegangan pada penalaan sistem eksitasi*

RESPON WAKTU TEGANGAN MENUJU KEADAAN MANTAP DALAM SATUAN DETIK		
Model sistem eksitasi	Sebelum penalaan	Setelah penalaan
Sistem eksitasi DC 1 dengan filter Lag-Lead	> 10	7.5
Sistem eksitasi AC 1 dengan umpan balik kecepatan	> 10	3

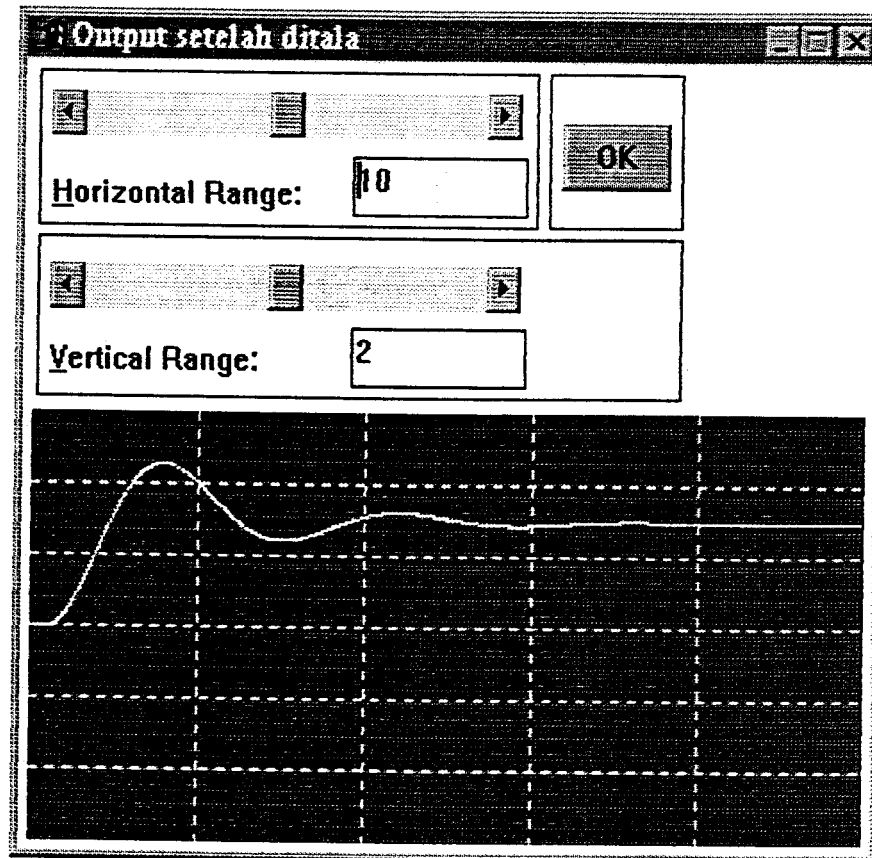
Dari tabel terlihat bahwa setelah penalaan terhadap parameter sistem eksitasi, memberikan respon waktu keadaan mantap lebih cepat. Sehingga teknik respon frekuensi dengan diagram Bode dapat dipakai untuk penalaan sistem.



**Gambar 4.4** Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe DC 1 sebelum penalaan

x\_axis : waktu

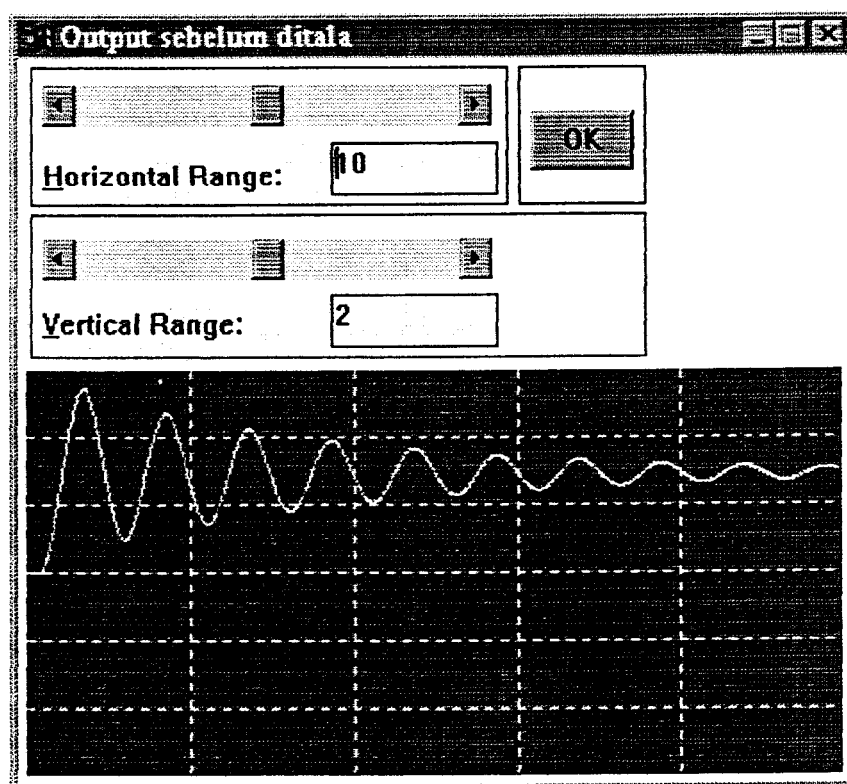
y\_axis : besaran (p.u)



**Gambar 4.5** Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe DC 1 setelah penalaan

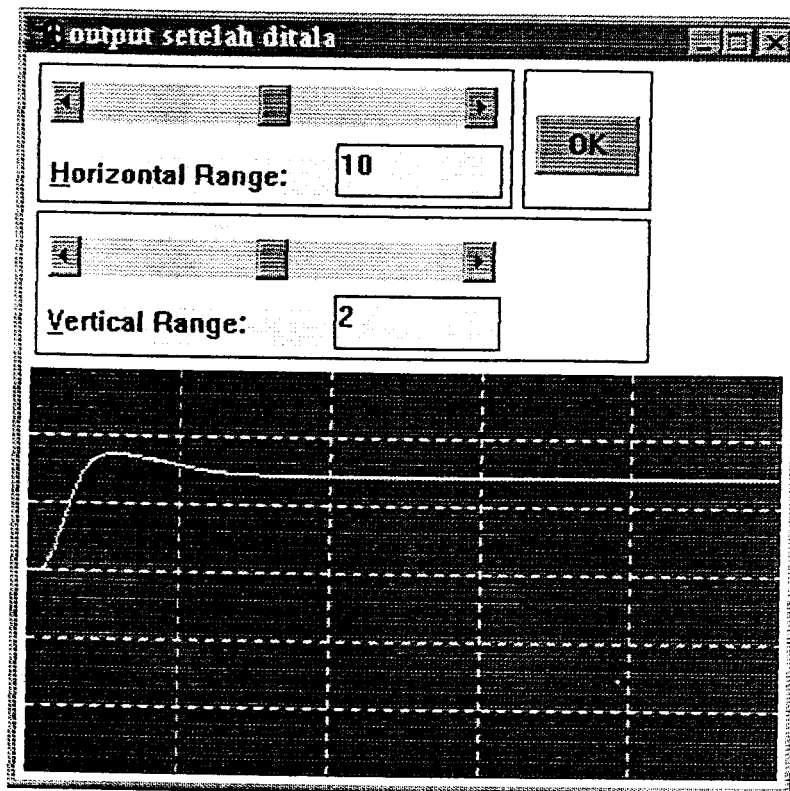
x\_axis : waktu  
y\_axis : besaran (p.u)





**Gambar 4.6** Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe AC 1 sebelum penalaan

x\_axis : waktu  
y\_axis : besaran (p.u)



**Gambar 4.7** Hasil simulasi model sistem eksitasi tipe AC 1 setelah penalaan

x\_axis : waktu  
y\_axis : besaran (p.u)

## **BAB V**

### **PENUTUP**

---

#### **5.1 KESIMPULAN**

Dari hasil simulasi penalaan parameter sistem eksitasi dengan diagram Bode dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Jalan sistematis dari pengecekan data dan memodifikasi parameter kontrol dalam sistem eksitasi dan juga untuk memperoleh hasil simulasi yang dapat dipercaya adalah langkah yang penting dalam studi kinerja dinamik pada sistem tenaga listrik.
2. Petunjuk aturan untuk penalaan parameter voltage regulator yang didasarkan pada teknik respon frekuensi dapat membuat tugas menjadi lebih analitis dan lebih sedikit untuk sistem coba-coba.
3. Penalaan dengan diagram Bode dari teknik respon frekuensi terhadap parameter-parameter sistem eksitasi yang membuat sistem menjadi tidak stabil, akan menghasilkan respon waktu keadaan mantap (respon menuju keadaan kestabilan), sehingga teknik respon frekuensi dengan diagram Bode ini dapat digunakan untuk memperbaiki kinerja dinamik sistem tenaga listrik.

## 5.2 SARAN-SARAN

Penelitian ini masih berupa studi dengan simulasi dari pemodelan sistem, simulasi gangguan dan studi pengendalian yang masih jauh dari keadaan sistem yang sesungguhnya. Realisasi dan penelitian-penelitian lebih lanjut perlu diadakan agar tercapai pemodelan yang lebih nyata, sehingga dapat dicapai kestabilan yang lebih baik.

## DAFTAR PUSTAKA

---

- [1] Central Electricity Generating Board, **Modern Power Station Practice**, Pergamon Press, Oxford, 1971, Second Ed, Vol.4, hal.38.
- [2] Fransisco P. de Mello and Charles Concordia, **Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control**, IEEE Transactions on Power Apparatus and System , Vol. PAS-88, No. 4, April 1969, pp. 316-329.
- [3] Imam Robandi, Tesis, **Studi Perbaikan Kinerja Dinamik Sistem Tenaga Listrik Multimesin Dengan Umpan Balik Optimal**, ITB, Nopember, 1994.
- [4] IEEE Guide for Identification, **Testing and Evaluation of The Dynamic Performance of Excitation Control System**, IEEE, New York, 1978.
- [5] IEEE Committee Report, **Excitation System Dynamic Characteristics**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol, PAS-92 , No. 1, January/February 1973, pp. 64-67.
- [6] IEEE Power Engineering Education Committee and the Excitation System Subcommittee of the Power Generation Committee, **IEEE Tutorial Course Power System Stabilization Via Exciattion Control**, September, 1980.

## LAMPIRAN A

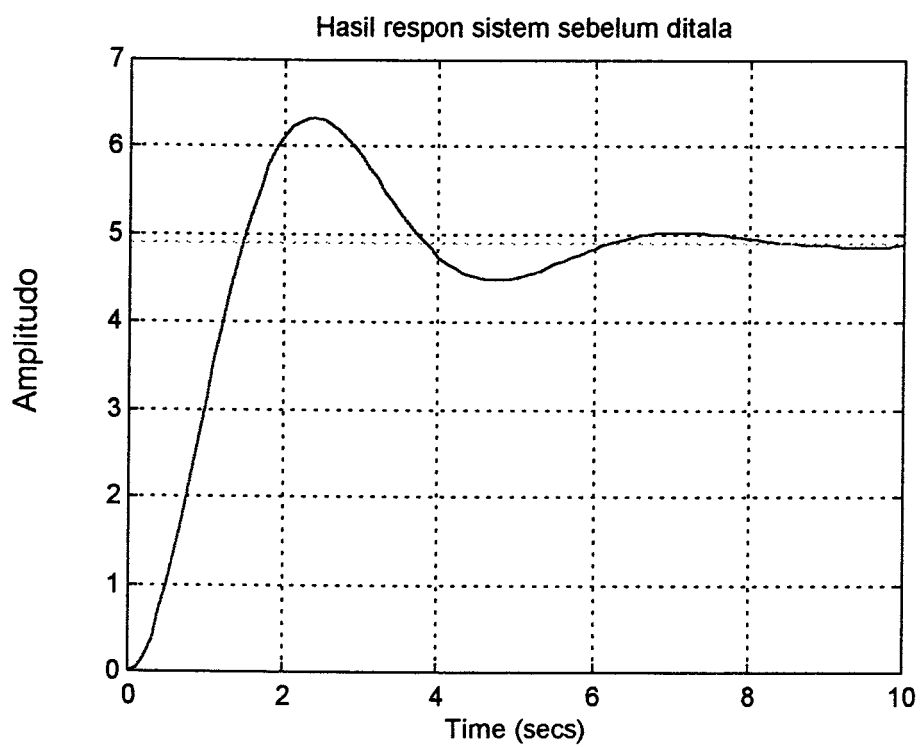
### PROGRAM SIMULASI PENALAAAN NILAI K UNTUK MEMBERIKAN KINERJA SISTEM YANG LEBIH BAIK

% Program disimulasikan dengan matlab for window

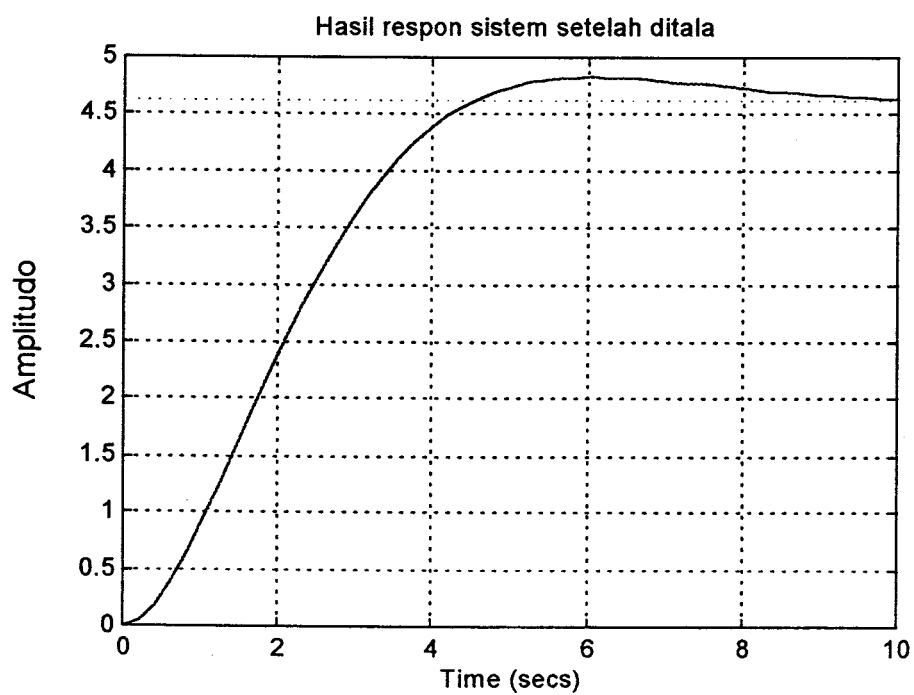
```
K=50;
n1=5;d1=1;
n2=K;d2=[25 1];
n3=1;d3=[1 1];
n4=1;d4=1;
nblocks=4;blkbuild
q=[1 0 0
   2 1 -4
   3 2 0
   4 3 0];
iu=[1];
iy=[4];
[A,B,C,D]=connect(a,b,c,d,q,iu,iy)
[num,den]=ss2tf(A,B,C,D,1)
figure(1)
step(A,B,C,D),grid
title('Hasil respon sistem sebelum ditala')
```

%Penalaan sistem

```
K=input('Input K yang baru = ');
n1=5;d1=1;
n2=K;d2=[25 1];
n3=1;d3=[1 1];
n4=1;d4=1;
nblocks=4;blkbuild
q=[1 0 0
   2 1 -4
   3 2 0
   4 3 0];
iu=[1];
iy=[4];
[A,B,C,D]=connect(a,b,c,d,q,iu,iy)
[num,den]=ss2tf(A,B,C,D,1)
figure(2)
step(A,B,C,D),grid
title('Hasil respon sistem setelah ditala')
```



Gambar A.1 Hasil simulasi parameter  $K$  yang belum ditala ( $K=50$ )



Gambar A.2 Hasil simulasi parameter  $K$  yang telah ditala ( $K=12.5$ )

## **LAMPIRAN B**

### **STABILISASI SISTEM KONTROL EKSITASI DAN REDUKSI GAIN TRANSIENT (TRANSIENT GAIN REDUCTION)**

Stabilizer sistem kontrol eksitasi adalah bentuk yang digunakan untuk menggambarkan prinsip rangkaian umpan balik eksiter. Sinyal umpan balik yang secara normal diperoleh dari tegangan medan generator atau ekivalennya, digunakan sebagai kompensasi parsial untuk time konstan eksiter dan operasi kestabilan yang diijinkan dari sistem kontrol eksitasi dengan setting gain regulator keadaan tunak yang lebih tinggi. Umpan balik ini dibutuhkan untuk kestabilan operasi tanpa saluran (off-line) untuk beberapa sistem eksitasi yang mempunyai time konstan yang penting. Pada saat umpan balik digunakan untuk stabilisasi tanpa saluran, stabilizer ini dapat digunakan untuk memodifikasi kinerja generator yang terhubung ke saluran (on-line).

Dengan respon awal sistem eksitasi yang tinggi, stabilising tidak secara normal dibutuhkan oleh generator yang tidak terhubung. Untuk operasi yang terhubung, ini mungkin dibutuhkan sekali untuk mengurangi loop pengatur tegangan pada frekuensi tinggi, untuk meminimumkan kontribusi negatif dari regulator untuk peredam sistem tenaga. Ini penting sekali dipakai ketika peredaman tidak dipertinggi dengan menggunakan Power Sistem Stabilizer (PSS).

Beberapa reduksi gain transient (transient gain reduction) ditemukan dalam model-model sistem eksitasi pada bagian regulator dengan memilih time

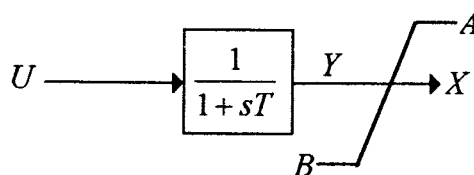


konstan lag-lead ( $T_B$  dan  $T_C$ ) atau dengan cara yang sama yaitu dengan memilih parameter  $K_F$  dan  $T_F$  yang sesuai pada bagian stabilising eksiter.

## LAMPIRAN C

### PENGERTIAN DARI LIMIT (BATAS)

Model-model yang digambarkan, membedakan antara batas windup dan batas non-windup. Fungsi dari kedua tipe batas ini ditunjukkan pada gambar C.1 dan C.2, yang menunjukkan pengaruh-pengaruh dari batas-batas output pada sebuah blok ketika fungsi alih memiliki satu time konstan. Harus dicatat bahwa pada batas windup, variabel  $Y$  tidak dibatasi, sehingga output variabel  $X$  tergantung dari variabel  $Y$ . Sedang pada batas non-windup variabel  $Y$  dibatasi, yaitu mendekati  $Y = A$  atau  $Y = B$ , yang secara tidak langsung menyatakan input  $U > A$  atau  $U < B$  berturut-turut. Output mendekati input  $U$  jika input diantara range dengan batas-batas yang ditetapkan oleh  $B \leq U \leq A$ .



**Gambar C.1** Batas windup

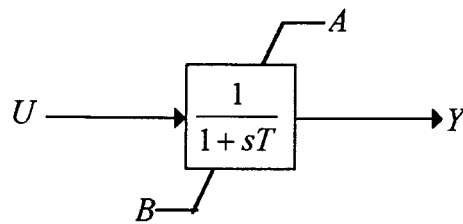
Sistem persamaannya :

$$dy/dt = (U - Y) / T$$

Jika  $B \leq Y \leq A$ , maka  $X = Y$

Jika  $Y > A$ , maka  $X = A$

Jika  $Y < B$ , maka  $X = B$



**Gambar C.2** *Batas non-windup*

Sistem persamaannya :

Jika  $Y = A$  dan  $F > 0$ , kemudian  $dy/dt$  di set menjadi 0

Jika  $Y = B$  dan  $F > 0$ , kemudian  $dy/dt$  di set menjadi 0

Sebaliknya jika  $dy/dt = f$ , maka  $B \leq Y \leq A$

## LAMPIRAN D

## LISTING PROGRAM SIMULINK

%SIMULASI PENALAAAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MODEL DC 1  
SEBELUM PENALAAAN DENGAN MENGGUNAKAN FILTER LAG-LEAD

```
function [ret,x0,str]=prog2(t,x,u,flag);
%PROG2 is the M-file description of the SIMULINK system named PROG2.
% The block-diagram can be displayed by typing: PROG2.
%
% SYS=PROG2(T,X,U,FLAG) returns depending on FLAG certain
% system values given time point, T, current state vector, X,
% and input vector, U.
% FLAG is used to indicate the type of output to be returned in SYS.
%
% Setting FLAG=1 causes PROG2 to return state derivatives, FLAG=2
% discrete states, FLAG=3 system outputs and FLAG=4 next sample
% time. For more information and other options see SFUNC.
%
% Calling PROG2 with a FLAG of zero:
% [SIZES]=PROG2([],[],[],0), returns a vector, SIZES, which
% contains the sizes of the state vector and other parameters.
% SIZES(1) number of states
% SIZES(2) number of discrete states
% SIZES(3) number of outputs
% SIZES(4) number of inputs.
% For the definition of other parameters in SIZES, see SFUNC.
% See also, TRIM, LINMOD, LINSIM, EULER, RK23, RK45, ADAMS,
GEAR.

% Note: This M-file is only used for saving graphical information;
% after the model is loaded into memory an internal model
% representation is used.

% the system will take on the name of this mfile:
sys = mfilename;
new_system(sys)
simver(1.2)
if(0 == (nargin + nargout))
    set_param(sys,'Location',[130,115,538,412])
    open_system(sys)
end;
```

```

set_param(sys,'algorithm',      'Euler')
set_param(sys,'Start time',    '0.0')
set_param(sys,'Stop time',     '10')
set_param(sys,'Min step size', '0.0001')
set_param(sys,'Max step size', '6')
set_param(sys,'Relative error','1e-4')
set_param(sys,'Return vars',  '')

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' Eksiter'])
set_param([sys,/, ' Eksiter'],...
          'Denominator','[0.5 0]',...
          'position',[415,97,450,133])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' Generator'])
set_param([sys,/, ' Generator'],...
          'Denominator','[5 1]',...
          'position',[495,97,530,133])

add_block('built-in/Sum',[sys,/, 'Sum'])
set_param([sys,/, 'Sum'],...
          'inputs','+-',...
          'position',[350,105,370,125])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' AVR'])
set_param([sys,/, ' AVR'],...
          'Numerator','[120]',...
          'Denominator','[0.15 1]',...
          'position',[260,93,310,127])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' lag-lead'])
set_param([sys,/, ' lag-lead'],...
          'Numerator','[1 1]',...
          'Denominator','[1 1]',...
          'position',[170,93,215,127])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn4'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn4'],...
          'orientation',2,...
          'Numerator','[0.02 0]',...
          'Denominator','[1 1]',...
          'position',[215,218,260,252])

add_block('built-in/Gain',[sys,/, 'Gain'])
set_param([sys,/, 'Gain'],...
          'orientation',2,...

```

```

        'position',[405,180,425,200])

add_block('built-in/Scope',[sys,/, 'Output'])
set_param([sys,/, 'Output'],...
    'Vgain','2.000000',...
    'Hgain','10.000000',...
    'Vmax','4.000000',...
    'Hmax','20.000000',...
    'Window',[6,187,422,562])
open_system([sys,/, 'Output'])
set_param([sys,/, 'Output'],...
    'position',[585,102,605,128])

add_block('built-in/Sum',[sys,/, 'Sum1'])
set_param([sys,/, 'Sum1'],...
    'inputs','+--',...
    'position',[105,92,125,128])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn5'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn5'],...
    'orientation',2,...
    'Denominator','[0 1]',...
    'position',[225,272,260,308])

add_block('built-in/Step Fcn',[sys,/, ' Input'])
set_param([sys,/, ' Input'],...
    'Time','0.05',...
    'position',[10,90,30,110])
add_line(sys,[400,190;335,190;335,120;340,120])
add_line(sys,[375,115;405,115])
add_line(sys,[455,115;485,115])
add_line(sys,[470,115;470,190;435,190])
add_line(sys,[315,110;340,110])
add_line(sys,[220,110;250,110])
add_line(sys,[130,110;160,110])
add_line(sys,[470,190;470,235;270,235])
add_line(sys,[35,100;95,100])
add_line(sys,[535,115;575,115])
add_line(sys,[210,235;75,235;75,120;95,120])
add_line(sys,[220,290;40,290;40,110;95,110])
add_line(sys,[560,115;560,290;270,290])

% Return any arguments.
if (nargin | nargout)
    % Must use feval here to access system in memory

```

```

    if (nargin > 3)
        if (flag == 0)
            eval(['ret,x0,str']='sys','(t,x,u,flag);'])
        else
            eval(['ret =', sys,'(t,x,u,flag);'])
        end
    else
        [ret,x0,str] = feval(sys);
    end
end
end

```

# **%SIMULASI PENALAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MODEL DC 1 SETELAH PENALAN DENGAN MENGGUNAKAN FILTER LAG-LEAD**

```

function [ret,x0,str]=prog2_1(t,x,u,flag);
%PROG2_1 is the M-file description of the SIMULINK system named
%PROG2_1.
% The block-diagram can be displayed by typing: PROG2_1.
%
% SYS=PROG2_1(T,X,U,FLAG) returns depending on FLAG certain
% system values given time point, T, current state vector, X,
% and input vector, U.
% FLAG is used to indicate the type of output to be returned in SYS.
%
% Setting FLAG=1 causes PROG2_1 to return state derivatives, FLAG=2
% discrete states, FLAG=3 system outputs and FLAG=4 next sample
% time. For more information and other options see SFUNC.
%
% Calling PROG2_1 with a FLAG of zero:
% [SIZES]=PROG2_1([],[],[],0), returns a vector, SIZES, which
% contains the sizes of the state vector and other parameters.
% SIZES(1) number of states
% SIZES(2) number of discrete states
% SIZES(3) number of outputs
% SIZES(4) number of inputs.
% For the definition of other parameters in SIZES, see SFUNC.
% See also, TRIM, LINMOD, LINSIM, EULER, RK23, RK45, ADAMS,
% GEAR.

% Note: This M-file is only used for saving graphical information;
% after the model is loaded into memory an internal model
% representation is used.

```

```

% the system will take on the name of this mfile:
sys = mfilename;
new_system(sys)
simver(1.2)
if(0 == (nargin + nargout))
    set_param(sys,'Location',[154,94,602,391])
    open_system(sys)
end;
set_param(sys,'algorithm',      'Euler')
set_param(sys,'Start time',    '0.0')
set_param(sys,'Stop time',     '10')
set_param(sys,'Min step size', '0.00001')
set_param(sys,'Max step size', '6')
set_param(sys,'Relative error','1e-4')
set_param(sys,'Return vars',  '')

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' Eksiter'])
set_param([sys,/, ' Eksiter'],...
    'Denominator',[0.5 0],...
    'position',[415,97,450,133])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' Generator'])
set_param([sys,/, ' Generator'],...
    'Denominator',[5 1],...
    'position',[495,97,530,133])

add_block('built-in/Sum',[sys,/, 'Sum'])
set_param([sys,/, 'Sum'],...
    'inputs','+-',...
    'position',[350,105,370,125])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' AVR'])
set_param([sys,/, ' AVR'],...
    'Numerator',[120],...
    'Denominator',[0.15 1],...
    'position',[260,93,310,127])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, ' lag-lead'])
set_param([sys,/, ' lag-lead'],...
    'Numerator',[1.8 1],...
    'Denominator',[12.96 1],...
    'position',[170,93,215,127])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn4'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn4'],...

```



```

        'orientation',2,...
        'Numerator','[0.02 0]',...
        'Denominator','[1 1]',...
        'position',[215,218,260,252])

add_block('built-in/Gain',[sys,/, 'Gain'])
set_param([sys,/, 'Gain'],...
    'orientation',2,...
    'position',[405,180,425,200])

add_block('built-in/Scope',[sys,/, 'Output'])
set_param([sys,/, 'Output'],...
    'Vgain','2.000000',...
    'Hgain','10.000000',...
    'Vmax','4.000000',...
    'Hmax','20.000000',...
    'Window',[209,91,615,461])
open_system([sys,/, 'Output'])
set_param([sys,/, 'Output'],...
    'position',[585,102,605,128])

add_block('built-in/Sum',[sys,/, 'Sum1'])
set_param([sys,/, 'Sum1'],...
    'inputs','+--',...
    'position',[105,92,125,128])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn5'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn5'],...
    'orientation',2,...
    'Denominator','[0 1]',...
    'position',[225,272,260,308])

add_block('built-in/Step Fcn',[sys,/, ' Input'])
set_param([sys,/, ' Input'],...
    'Time','0.05',...
    'position',[10,90,30,110])
add_line(sys,[400,190;335,190;335,120;340,120])
add_line(sys,[375,115;405,115])
add_line(sys,[455,115;485,115])
add_line(sys,[470,115;470,190;435,190])
add_line(sys,[315,110;340,110])
add_line(sys,[220,110;250,110])
add_line(sys,[130,110;160,110])
add_line(sys,[470,190;470,235;270,235])
add_line(sys,[35,100;95,100])

```

```

add_line(sys,[535,115;575,115])
add_line(sys,[210,235;75,235;75,120;95,120])
add_line(sys,[220,290;40,290;40,110;95,110])
add_line(sys,[560,115;560,290;270,290])

% Return any arguments.
if (nargin | nargout)
    % Must use feval here to access system in memory
    if (nargin > 3)
        if (flag == 0)
            eval(['ret,x0,str']='sys','(t,x,u,flag);'])
        else
            eval(['ret =' , sys,'(t,x,u,flag);'])
        end
    else
        [ret,x0,str] = feval(sys);
    end
end

```

**%SIMULASI PENALAAAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MODEL AC 1  
SEBELUM PENALAAAN DENGAN MENGGUNAKAN TIPE UMPAN BALIK  
KECEPATAN (RATE FEEDBACK)**

```

function [ret,x0,str]=prog4(t,x,u,flag);
%PROG4 is the M-file description of the SIMULINK system named PROG4.
% The block-diagram can be displayed by typing: PROG4.
%
% SYS=PROG4(T,X,U,FLAG) returns depending on FLAG certain
% system values given time point, T, current state vector, X,
% and input vector, U.
% FLAG is used to indicate the type of output to be returned in SYS.
%
% Setting FLAG=1 causes PROG4 to return state derivatives, FLAG=2
% discrete states, FLAG=3 system outputs and FLAG=4 next sample
% time. For more information and other options see SFUNC.
%
% Calling PROG4 with a FLAG of zero:
% [SIZES]=PROG4([],[],[],0), returns a vector, SIZES, which
% contains the sizes of the state vector and other parameters.
% SIZES(1) number of states
% SIZES(2) number of discrete states
% SIZES(3) number of outputs
% SIZES(4) number of inputs.

```

```
% For the definition of other parameters in SIZES, see SFUNC.
% See also, TRIM, LINMOD, LINSIM, EULER, RK23, RK45, ADAMS,
GEAR.
```

```
% Note: This M-file is only used for saving graphical information;
% after the model is loaded into memory an internal model
% representation is used.
```

```
% the system will take on the name of this mfile:
```

```
sys = mfilename;
new_system(sys)
simver(1.2)
if(0 == (nargin + nargout))
    set_param(sys,'Location',[19,62,262,469])
    open_system(sys)
end;
set_param(sys,'algorithm',      'Euler')
set_param(sys,'Start time',     '0.0')
set_param(sys,'Stop time',      '10')
set_param(sys,'Min step size',  '0.000001')
set_param(sys,'Max step size',  '10')
set_param(sys,'Relative error','1e-3')
set_param(sys,'Return vars',    '')
```

```
add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'AVR'])
set_param([sys,/, 'AVR'],...
    'Numerator','[120]',...
    'Denominator','[0.15 1]',...
    'position',[260,107,295,143])
```

```
add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn4'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn4'],...
    'orientation',2,...
    'Numerator','[0.38]',...
    'Denominator','[5 1]',...
    'position',[445,227,480,263])
```

```
add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Stabilizer'])
set_param([sys,/, 'Stabilizer'],...
    'orientation',2,...
    'Numerator','[(0.02) 0]',...
    'Denominator','[1 1]',...
    'position',[250,276,315,314])
```

```
add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Stabilizer '])
```

```

set_param([sys,'/','Stabilizer '],...
          'orientation',2,...
          'Numerator','[(0.0076) 0]',...
          'Denominator','[(5) (6) 1]',...
          'position',[225,336,350,374])

```

```

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,'/','Transfer Fcn2'])
set_param([sys,'/','Transfer Fcn2'],...
          'orientation',2,...
          'Denominator','[0 1]',...
          'position',[445,172,480,208])

```

```

add_block('built-in/Sum',[sys,'/','Sum'])
set_param([sys,'/','Sum'],...
          'inputs','+--',...
          'position',[360,117,380,153])

```

```

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,'/','Eksiter'])
set_param([sys,'/','Eksiter'],...
          'Denominator','[0.5 0]',...
          'position',[440,117,475,153])

```

```

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,'/','Generator'])
set_param([sys,'/','Generator'],...
          'Denominator','[5 1]',...
          'position',[580,117,615,153])

```

```

add_block('built-in/Sum',[sys,'/','Sum1'])
set_param([sys,'/','Sum1'],...
          'inputs','+--',...
          'position',[195,107,215,143])

```

```

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,'/','Transfer Fcn7'])
set_param([sys,'/','Transfer Fcn7'],...
          'orientation',2,...
          'Denominator','[ 1]',...
          'position',[260,407,295,443])

```

```

add_block('built-in/Sum',[sys,'/','Sum2'])
set_param([sys,'/','Sum2'],...
          'inputs','+--',...
          'position',[110,105,130,125])

```

```

add_block('built-in/Step Fcn',[sys,'/','Step Fcn'])
set_param([sys,'/','Step Fcn'],...

```

```

        'Time','0.05',...
        'position',[10,100,30,120])

add_block('built-in/Scope',[sys,/, 'Output sebelum ditala'])
set_param([sys,/, 'Output sebelum ditala'],...
    'Vgain','2.000000',...
    'Hgain','10.000000',...
    'Vmax','4.000000',...
    'Hmax','20.000000',...
    'Window',[260,16,646,377])
open_system([sys,/, 'Output sebelum ditala'])
set_param([sys,/, 'Output sebelum ditala'],...
    'position',[725,122,745,148])
add_line(sys,[480,135;570,135])
add_line(sys,[385,135;430,135])
add_line(sys,[300,125;350,125])
add_line(sys,[220,125;250,125])
add_line(sys,[135,115;185,115])
add_line(sys,[440,190;325,190;325,145;350,145])
add_line(sys,[440,245;310,245;310,135;350,135])
add_line(sys,[515,135;515,190;490,190])
add_line(sys,[515,190;515,245;490,245])
add_line(sys,[245,295;170,295;170,135;185,135])
add_line(sys,[220,355;150,355;150,125;185,125])
add_line(sys,[35,110;100,110])
add_line(sys,[620,135;715,135])
add_line(sys,[545,135;545,295;325,295])
add_line(sys,[545,295;545,355;360,355])
add_line(sys,[655,135;655,425;305,425])
add_line(sys,[255,425;70,425;70,120;100,120])

% Return any arguments.
if (nargin | nargout)
    % Must use feval here to access system in memory
    if (nargin > 3)
        if (flag == 0)
            eval(['ret,x0,str']=sys,'(t,x,u,flag);'])
        else
            eval(['ret =', sys,'(t,x,u,flag);'])
        end
    else
        [ret,x0,str] = feval(sys);
    end
end
end

```

%SIMULASI PENALAAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MODEL AC 1  
 SETELAH PENALAAN DENGAN MENGGUNAKAN TIPE UMPAN BALIK  
 KECEPATAN (RATE FEEDBACK)

```
function [ret,x0,str]=prog4_1(t,x,u,flag);
%PROG4_1 is the M-file description of the SIMULINK system named
PROG4_1.
% The block-diagram can be displayed by typing: PROG4_1.
%
% SYS=PROG4_1(T,X,U,FLAG) returns depending on FLAG certain
% system values given time point, T, current state vector, X,
% and input vector, U.
% FLAG is used to indicate the type of output to be returned in SYS.
%
% Setting FLAG=1 causes PROG4_1 to return state derivatives, FLAG=2
% discrete states, FLAG=3 system outputs and FLAG=4 next sample
% time. For more information and other options see SFUNC.
%
% Calling PROG4_1 with a FLAG of zero:
% [SIZES]=PROG4_1([],[],[],0), returns a vector, SIZES, which
% contains the sizes of the state vector and other parameters.
% SIZES(1) number of states
% SIZES(2) number of discrete states
% SIZES(3) number of outputs
% SIZES(4) number of inputs.
% For the definition of other parameters in SIZES, see SFUNC.
% See also, TRIM, LINMOD, LINSIM, EULER, RK23, RK45, ADAMS,
GEAR.

% Note: This M-file is only used for saving graphical information;
% after the model is loaded into memory an internal model
% representation is used.

% the system will take on the name of this mfile:
sys = mfilename;
new_system(sys)
simver(1.2)
if(0 == (nargin + nargout))
    set_param(sys,'Location',[32,146,401,460])
    open_system(sys)
end;
set_param(sys,'algorithm', 'Euler')
set_param(sys,'Start time', '0.0')
set_param(sys,'Stop time', '10')
set_param(sys,'Min step size', '0.000001')
```

```

set_param(sys,'Max step size','10')
set_param(sys,'Relative error','1e-3')
set_param(sys,'Return vars',' ')

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'AVR'])
set_param([sys,/, 'AVR'],...
    'Numerator','[49.7]',...
    'Denominator','[0.15 1]',...
    'position',[260,107,295,143])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn4'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn4'],...
    'orientation',2,...
    'Numerator','[0.38]',...
    'Denominator','[5 1]',...
    'position',[445,227,480,263])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Stabilizer'])
set_param([sys,/, 'Stabilizer'],...
    'orientation',2,...
    'Numerator','[(0.0503) 0]',...
    'Denominator','[0.75 1]',...
    'position',[250,276,315,314])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Stabilizer '])
set_param([sys,/, 'Stabilizer '],...
    'orientation',2,...
    'Numerator','[(0.019114) 0]',...
    'Denominator','[(3.75) (5.75) 1]',...
    'position',[225,336,350,374])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn2'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn2'],...
    'orientation',2,...
    'Denominator','[0 1]',...
    'position',[445,172,480,208])

add_block('built-in/Sum',[sys,/, 'Sum'])
set_param([sys,/, 'Sum'],...
    'inputs','+--',...
    'position',[360,117,380,153])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Eksiter'])
set_param([sys,/, 'Eksiter'],...
    'Denominator','[0.5 0]',...

```

```

        'position',[440,117,475,153])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Generator'])
set_param([sys,/, 'Generator'],...
    'Denominator','[5 1]',...
    'position',[580,117,615,153])

add_block('built-in/Sum',[sys,/, 'Sum1'])
set_param([sys,/, 'Sum1'],...
    'inputs','+--',...
    'position',[195,107,215,143])

add_block('built-in/Transfer Fcn',[sys,/, 'Transfer Fcn7'])
set_param([sys,/, 'Transfer Fcn7'],...
    'orientation',2,...
    'Denominator','[ 1]',...
    'position',[260,407,295,443])

add_block('built-in/Sum',[sys,/, 'Sum2'])
set_param([sys,/, 'Sum2'],...
    'inputs','+-',...
    'position',[110,105,130,125])

add_block('built-in/Step Fcn',[sys,/, 'Step Fcn'])
set_param([sys,/, 'Step Fcn'],...
    'Time','0.05',...
    'position',[10,100,30,120])

add_block('built-in/Scope',[sys,/, 'Output setelah ditala'])
set_param([sys,/, 'Output setelah ditala'],...
    'Vgain','2.000000',...
    'Hgain','10.000000',...
    'Vmax','4.000000',...
    'Hmax','20.000000',...
    'Window',[282,14,641,394])
open_system([sys,/, 'Output setelah ditala'])
set_param([sys,/, 'Output setelah ditala'],...
    'position',[740,122,760,148])
add_line(sys,[480,135;570,135])
add_line(sys,[385,135;430,135])
add_line(sys,[300,125;350,125])
add_line(sys,[220,125;250,125])
add_line(sys,[135,115;185,115])
add_line(sys,[440,190;325,190;325,145;350,145])
add_line(sys,[440,245;310,245;310,135;350,135])

```



```

add_line(sys,[515,135;515,190;490,190])
add_line(sys,[515,190;515,245;490,245])
add_line(sys,[245,295;170,295;170,135;185,135])
add_line(sys,[220,355;150,355;150,125;185,125])
add_line(sys,[35,110;100,110])
add_line(sys,[620,135;730,135])
add_line(sys,[545,135;545,295;325,295])
add_line(sys,[545,295;545,355;360,355])
add_line(sys,[655,135;655,425;305,425])
add_line(sys,[255,425;70,425;70,120;100,120])

% Return any arguments.
if (nargin | nargout)
    % Must use feval here to access system in memory
    if (nargin > 3)
        if (flag == 0)
            eval(['[ret,x0,str]=',sys,'(t,x,u,flag);'])
        else
            eval(['ret =', sys,'(t,x,u,flag);'])
        end
    else
        [ret,x0,str] = feval(sys);
    end
end
end

```

25 OCT 1996

**EL.1799 TUGAS AKHIR-6 SKS**

Nama : I Nyoman Wisnawa  
Nrp. : 2292.100.099  
Bidang Studi : Teknik Sistem Tenaga  
Tugas diberikan : Oktober 1996  
Tugas diselesaikan : April 1997  
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Sidarjanto  
2. Ir. Imam Robandi, MT.

**Judul Tugas Akhir :**

**STUDI PENALAAAN PARAMETER SISTEM EKSITASI  
MENGUNAKAN TEKNIK RESPON FREKUENSI**

**Uraian Tugas Akhir**

Program simulasi sistem daya modern dalam pengujian dan pengecekan datanya memerlukan waktu dan energi yang cukup besar. Pengujian dan pengecekan ini untuk keandalan dalam menempatkan gambaran yang terperinci mengenai lebih dari 3000 unit pembangkit. Salah satunya adalah mengenai penalaan sistem eksitasi unit pembangkit.

Dalam mengertikan dan mengoreksi parameter-parameter yang terdapat pada model sistem eksitasi maka dipakai teknik respon frekuensi, dimana data sistem eksitasi yang jumlahnya beratus-ratus unit diperiksa dalam waktu yang singkat, tanpa test data yang lain dan tanpa adanya link yang lain ke peralatan aktual selain data sheet dari perusahaan atau beberapa susunan data yang khusus.

Dalam tugas akhir ini akan dibahas mengenai penalaan parameter-parameter eksitasi dan pengujian karakteristik sinyal dasar yang kecil yang khusus untuk sistem eksitasi modern.

Surabaya, 1 Oktober 1996

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

  
Ir. Sidarjanto.

  
Ir. Imam Robandi, MT.

Mengetahui :

Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS

Bidang Studi Sistem Tenaga

Ketua,

Koordinator,

  
Dr. Ir. Moch. Salehudin, M. Eng. Sc.

  
Ir. Sidarjanto.

Nip : 130532026

Nip : 130532009

# Usulan Tugas Akhir

1. Judul : STUDI PENALAN PARAMETER SISTEM EKSITASI MENGGUNAKAN TEKNIK RESPON FREKUENSI
2. Ruang Lingkup :
  - Kontrol Eksitasi
  - Kontrol Pembangkit Daya
  - Eksitasi Simulasi Sistem Daya.
3. Latar Belakang : Semakin berkembangnya kebutuhan akan tenaga listrik dewasa ini sangatlah perlu ditunjang oleh keandalan operasi dari sistem tenaga listrik. Keandalan operasi ini dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya adalah adanya perubahan beban. Hal ini sangat berpengaruh terhadap parameter-parameter sistem eksitasi. Dimana parameter-parameter ini menentukan respon exciter yang mengikuti gangguan yang besar pada sistem. Ketidaklinearan ini harus dicek dan diuji terhadap semua karakteristik peralatan seperti batas eksitasi dan ratio respon sebagai sebuah komplemen yang penting pada teknik pengaturan sinyal.
4. Tinjauan Pustaka : Batas dan parameter non linear dalam model-eksitasi sangat penting. Teknik respon frekuensi adalah dasar pengaturan sistem kontrol eksitasi tersebut [1]. Pengaturan dari semua loop kontrol yang dipakai merupakan suatu kerjasama diantara kecepatan dan stabilitas. Tujuan penalaan exciter [2] memungkinkan kinerja exciter lebih baik karena gain steady state dihubungkan secara langsung dengan regulasi exciter. Pengurangan gain transient adalah salah satu metode yang digunakan secara luas pada industri untuk menentukan kestabilan sistem dengan pengaturan tegangan melalui regulasi exciter. Pengurangan gain transient diimplementasikan dan sudah memberikan 2 tipe yang populer pada model sistem eksitasi yang dapat ditemukan pada industri power [3]. Dari dua tipe ini dengan penalaan parameter sistem eksitasi menggunakan teknik respon frekuensi diharapkan memperoleh kinerja sistem yang lebih baik.
5. Maksud dan Tujuan : Menentukan parameter-parameter dari model sistem eksitasi.
6. Metodologi : Metode Penelitian yang dipakai adalah :

- Studi Literatur / Kepustakaan.

7. Langkah-langkah : - Studi Literatur,  
- Menganalisis Permasalahan,  
- Evaluasi Permasalahan,  
- Penyusunan Laporan Penelitian Tugas Akhir.

8. Relevansi : Memperbaiki kinerja sistem.

#### 9. Jadual

Langkah Kegiatan Penelitian Tugas Akhir	Bulan Ke					
	1	2	3	4	5	6
Studi Literatur	■	■	■			
Menganalisis Permasalahan		■	■	■		
Evaluasi Permasalahan			■	■	■	
Penyusunan Laporan Penelitian Tugas Akhir		■	■	■	■	■

#### 10. Referensi

- [1]. IEEE COMMITTEE REPORT, " Excitation System Dynamic Characteristics", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol, PAS-92, No. 1, January/February 1973, pp. 64-75.
- [2]. Fransisco P. de Mello and Charles Concordia, " Concepts of Synchronous Machine Stability as Affacted by Excitation Control ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, April 1969, pp. 316-329.
- [3]. IEEE COMMITTEE REPORT, " Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2 February 1981, pp. 494-509.